ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE



RAPORTTEJA
RAPPORTER
REPORTS
2009:3

REVONTULIHAVAINNOT SUOMESSA, 1748–2009

HEIKKI NEVANLINNA

RAPORTTEJA
RAPPORTER
REPORTS
2009:3

REVONTULIHAVAINNOT SUOMESSA, 1748–2009

Heikki Nevanlinna

Ilmatieteen laitos
Meteorologiska Institutet
Finnish Meteorological Institute

Helsinki 2009

ISBN 978-951-697-697-9 (nid.)
ISBN 978-951-697-698-6 (pdf)
ISSN 0782-6079

Yliopistopaino
Helsinki 2009

ILMATIETEEN LAITOS

Julkaisusarja: Raportteja 2009:3

Julkaisija Ilmatieteen laitos, (Erik Palménin aukio 1)
PL 503, 00101 Helsinki

Julkaisuaika 16.9.2009

Tekijä(t):
Heikki Nevanlinna

Projektin nimi

Nimeke: Revontulihavainnot Suomessa, 1748–2009

Tiivistelmä

Tässä raportissa esitetään katsaus Suomessa tehdyistä revontulihavainnoista noin 260 vuoden ajalta 1748–2009. Tältä ajalta on olemassa jokseenkin katkoton aikasarja revontulien esiintymisistä maassamme. Havainnot koostuvat varhaisimmilta vuosilta säähavaintojen yhteydessä tehdyistä merkinnöistä taivaalla näkyvistä visuaalisista revontulista. Tällaisista havainnoista muodostuvat Turussa ja Helsingissä tehdyt havainnot 1748–1843. Sittemmin Suomen sääasemilla merkittiin synoptisten säähavaintojen lisäksi tiedot revontulista (1881–1964) ja ne ovat saatavilla meteorologisista vuosikirjoista. Visuaalisia revontulihavaintoja on näin kertynyt useita tuhansia.

Revontuliöiden lukumäärä vuotta kohden kertoo avaruussäätilan hitaista vaihteluista ja viime kädessä auringon aktiivisuuden tilasta. Suomessa tehdyt revontulihavainnot täydentävät vastaavia maapallonlaajuisia avaruusää ja -ilmasto-aineistoja ja antavat alan tutkimukseen merkittävän lisän. Revontulihavaintojen mukaan revontuliaktiivisuus oli erittäin alhaisella tasolla 1800-luvun kahden ensimmäisen vuosikymmenen aikana, jolloin auringon aktiivisuus oli pitkään poikkeuksellisen vähäistä (ns. Daltonin minimi).

Pitkäaikainen revontuliaktiivisuus kasvoi havaintojen mukaan Suomessa ja pohjoisella polaarialueella 1900-luvun alusta 1960-luvun alkuun noin kolminkertaiseksi. Kasvu liittyi auringon aktiivisuuden yleiseen voimistumiseen samana aikana, joka voidaan todeta mm. kasvaneesta geomagneettisesta häiriöisyydestä. Revontulien määrät ja auringon aktiivisuuden pitkän aikavälin kehityskulut pysyivät olennaisesti vakiona 1960-luvulta vuosisadan loppuun saakka. Koko 2000-luvun ajan auringon keskimääräinen aktiivisuuus ja revontulitoiminta on vähentynyt nopeasti. Jos kehityskulku jatkuu samansuuntaisena, niin tulevat auringonpilkkumaksimit seuraavina vuosikymmeninä ovat aikaisempia jaksoja olennaisesti pienempia. Tämä merkitsee siis myös sitä, että tulevat avaruussään häiriöt ja revontulet ovat merkittävästi heikompia kuin aktiivisimpina vuosina 1950-luvun lopulla.

Revontulien kuvaukset aloitettiin Ilmatieteen laitoksella Kansainvälisen Geofysiikan Vuoden aikana 1957–1958 erikoisvalmisteisilla All-Sky -kameroilla. Kamerat olivat toiminnassa Lapissa useilla havaintopaikoilla noin 40 vuoden ajan. Kuvia on kertynyt miljoonia. Visuaalisiin revontulihavaintoihin verrattuna kamerat antavat huomattavasti objektiivisempaa tietoa revontulien esiintymisfrekvensseistä pimeään aikaan havaintokauden aikana syksystä keväälle. Revontulien visuaalihavainnot antavat tietoa aktiivisimmista revontulista magneettisten myrskyjen aikaan, jolloin niiden esiintyminen noudattaa auringonpilkkujen 11-vuotista jaksollisuutta. Revontulikameroiden kuvista johdetut revontulien esiintymistodennäköisyysindeksin vuosiarvot (*AO*; Auroral Occurrence) (1973–1997) seuraavat heikosti auringonpilkkujen määrien kehitystä, ja indeksi saa korkeita arvoja myös pilkkujen esiintymisen minimikausina, jolloin magneettiset häiriöt ja voimakkaat revontulet ovat harvinaisia. Ero visuaalisten revontulihavaintojen ja kameratietojen välillä johtuu siitä, että kamerat tallentavat myös heikot revontulivalot kaikkina pimeinä tunteina, joita vain iltaan ja alkuyöhön ajoittuvat visuaalihavainnot eivät kata. Näin *AO*-indeksiin kertyy revontulien esiintymistietoja enemmän kuin niukemmissa visuaalihavainnoissa. *AO*-indeksikin liittyy auringon aktiivisuuteen aurinkotuulen pitkäaikaisvaihtelujen kautta: *AO*:n vuosiarvot seuraavat varsin tarkkaan aurinkotuulen sähkökentän vaihteluja (satelliittihavainnoista), jotka säätelevät revontuliaktiivisuutta kaikkina aikoina. Auringon aktiivisuuden hiljaisinakin aikoina revontuli-indeksi *AO* saavuttaa Lapissa tyypillisesti noin 40 % lukemia, kun se keskimäärin on noin 60 % ja aktiivisina periodeina yli 80 %.

Ilmatieteen laitoksen nykyinen revontulikamerakanta koostuu CCD-tekniikkaan perustuvista kameroista, jotka ovat olleet käytössä Lapissa ja Huippuvuorilla vuodesta 1996 lähtien. Kamerat toimivat etäohjauksessa ja niiden tuottamaa kuvamateriaalia voidaan automaattisesti analysoida kuvankäsittelyohjelmilla. Revontulikamerat ja magnetometrit ovat osa Fennoskandian alueella tapahtuvaa avaruussään monitorointia kansainvälisessä MIRACLE-verkossa, jonka toimintoja koordinoi Ilmatieteen laitos.

Julkaisijayksikkö: Havaintopalvelut & Viestintä

Luokitus (UDK) 551.594, 52

Asiasanat: Revontulet, avaruussää

ISSN ja avainnimike: 0782-6079

ISBN: 978-951-697-697-9 (nid.), 978-951-697-698-6 (pdf)

Kieli: Suomi

Myynti
Ilmatieteen laitos
PL 503, 00101 Helsinki

Sivumäärä: 88

Hinta: 10 e



Ennen revontulien kamerakuvauksia tarvittiin kuvaamataiteilijoita avuksi revontulien muotoja ja värejä ikuistettaessa. Kuvassa on taiteilija Harald Moltken (1871–1960) näkemys revontulista Utsjoella 22.2.1901. Moltke kuului tanskalaiseen tutkimusretkikuntaan, joka oli matkalla Suomen Lapissa 1900–1901. Taustalla on edelleen käytössä oleva Utsjoen vanha kivikirkko 1850-luvulta. Maalaus kuvaa revontulia Utsjoen pappilan pihalta nähtynä.

Ensimmäiset onnistuneet revontulien kamerakuvaukset tehtiin 1890-luvulla (EATHER, 1980), mutta tieteellisessä mielessä kuvaukset käynnistyivät vasta 1900-luvun alussa (STÖRMER, 1932; 1955). Revontulien värivalokuvaus onnistui vasta 1950-luvun alussa. Säännölliset revontulikuvaukset aloitettiin Ilmatieteen laitoksen revontulikameroilla Kansainvälisen Geofysiikan Vuoden 1957–1958 aikana Lapissa.

SISÄLLYSLUETTELO

Sivu

ESIPUHE 6

1 JOHDANTO 8
1.1 *Revontulet Antiikin aikoina*
1.2 *Revontulet Keskiajalla* 10
1.3 *Revontulet luonnontieteiden nousukaudella 1600-luvulla* 11
1.4 *Revontulihavaintojen alku Suomessa* 13

2 REVONTULET KANSANPERINTEESSÄ 17

3 REVONTULITILASTOJA 1700–1900 -LUVUILTA 22
3.1 *Hällströmin revontulitilasto 1748–1843* 24
3.2 *Suomen Tiedeseuran havainnot 1846–1855* 31
3.3 *I Polaarivuoden havainnot Sodankylässä 1882–1883(1884)* 33
3.3.1 *Lemströmin virtamittaukset revontulien yhteydessä* 38
3.3.2 *Polaarivuoden tuloksia* 41
3.4 *A.E. Nordenskiöldin revontulimittaukset Koillisväylän purjehduksella* 43
3.5 *Revontulivyöhykkeet 1800-luvulla* 44
3.6 *Revontulihavainnot synoptisten säähavaintojen yhteydessä 1881–1964* 47

4 REVONTULIHAVAINNOT II POLAARIVUODESTA NYKYAIKAAN 54
4.1 *II Polaarivuosi (1932–1933)* 54
4.2 *Kansainvälinen Geofysiikan Vuosi (1957–1958) ja revontulikamerat* 55
4.3 *CCD-kamerat revontulikuvauksissa (1996-)* 60

5 REVONTULIEN ESIINTYMISTILASTOJA 1973–2009 67

6 MUITA REVONTULIHAVAINTOJA 77

7 YHTEENVETO 80

8 KIRJALLISUUSVIITTEET 83

ESIPUHE

Tässä raportissa esitetään katsaus revontuli-ilmiön havaintoihin ja havaintolaitteisiin Suomessa 1700-luvulta nykyaikaan. Esitys rajoittuu vain revontulien optiseen ilmentymään, joten monet revontuliin liittyvät muut mittaukset (esim. ionosfääritutkat) jäävät tarkastelun ulkopuolelle. Tutkimukseen sisältyy myös revontulien esiintymistilastoja eri ajanjaksoilta vuorokausivaihteluista auringonpilkkujaksoihin.

Vanhimmat tutkimukset revontulista perustuvat visuaalisiin havaintoihin, joista saadaan tietoa revontuliöiden lukumäärästä eri aikoina. Varhaisimman revontulihavaintosarjan alku sijoittuu vuoteen 1748 ja havaintopaikkana oli Turku. Myöhemmin 1800-luvulla revontulihavainnot liitettiin kiinteästi synoptisten säähavaintojen yhteyteen. Näitä havaintoja tehtiin aina 1960-luvulle saakka. Revontulien kuvaukset erikoiskameroilla alkoivat Ilmatieteen laitoksella Kansainvälisen Geofysiikan vuoden aikana 1957–1958 useilla havaintopaikoilla Lapissa. Kameratoiminta on jatkunut siitä lähtien, mutta kuvauksiin tarvittavat laitteet ja kuvien käsittelytekniikka ovat uudistu-neet moneen kertaan. Käytettävissä olevien revontulikuvien määrä nousee miljooniin.

Kaikkiaan Suomen revontulihavainnoista on jokseenkin katkeamaton havaintosarja, joka kattaa yli 250 vuotta. Sen kautta on mahdollista saada tietoa revontuliaktiivisuudesta eri aikaväleillä, joka kertoo revontuli-ilmiön perimmäisen aiheuttajan, auringon aktiivisuuden, muutoksista avaruussään ja -ilmaston vaihteluissa.

Tämän päivän revontulikuvaukset ovat olennainen osa Ilmatieteen laitoksen avaruussään monitorointia yhtenä havaintomenetelmänä monien muiden joukossa. Revontulikuvaukset tarjoavat myös korkeatasoista materiaalia maapallon lähiavaruuden tutkimuksiin. Ilmatieteen laitoksen avaruustutkimuksessa revontulihavainnoista, osana laajempaa magnetosfääritutkimusta, on tehty lukuisia tieteellisiä tutkimuksia ja akateemisia väitöskirjoja. Revontuliaineisto on laajassa kansainvälisessä käytössä. Laitteistojen kehitystyötä ja revontulikuvien analysointitekniikkaa on myös edistetty merkittävästi.

1 JOHDANTO

Ensimmäiset käsitykset revontulien luonteesta esitettiin jo Antiikin aikoina satoja vuosia ennen ajanlaskun alkua. Antiikin aikakaudella luodut peruskäsitykset revontulien ominaisuuksista ja syistä jäivät elämään aina Uuden ajan alkuun saakka 1600-luvulle asti vaikka käsitykset revontulien fysikaalisista ominaisuuksista olivat erittäin puutteellisia. Vasta seuraavina vuosisatoina luonnontieteet ja niissä käytetyt havaintomenetelmät alkoivat kehittyä kohti rationaalista tiedonmuodostusta maapallon geofysikaalisia ominaisuuksia tutkittaessa. Tämän mukana selvisi revontuli-ilmiön olemus toisaalta aurinko-maa vuorovaikutussysteemin osana avaruussääprosesseissa, toisaalta atomaarisella tasolla avaruusplasman sähkömagneettisina tapahtumina.

1.1 *Revontulet Antiikin aikoina*

Länsimaisessa tieteen traditiossa revontulet esiintyvät tutkimuksen ja havaintojen kohteena Aristoteleen (384 – 322 eKr.) kirjoituksissa. Tämän filosofin teoksien luettelossa on opus VII (GOOLD, 1987), joka tunnetaan nimellä *Meteorologica*. Se on ollut todennäköisesti kokoelma Aristoteleen pitämistä luennoista. Yhtenäisen kirjan muodossa ne ilmestyivät vuoden 340 eKr. vaiheilla, vaikka yhtään alkuperäistä kappaletta ei ole säilynyt. Aristoteleen mukaan meteorologian piiriin kuuluivat lähes kaikki nykyään geofysiikkaan ja geologiaan kuuluvat tieteenalat, mutta tähän laskettiin myös monet nykyään tähtitieteen alaan kuuluvat ilmiöt kuten tähdenlennot, pyrstötähdet ja Linnunrata.

Aristoteleen elementtiopin mukaan fyysinen olevainen koostuu neljästä alkuaineesta: maa, vesi, ilma ja tuli. Maapallon tapauksessa näiden esiintyminen on pääasiassa järjestäytynyt alhaalta ylöspäin aina kuun radalle saakka. Sen tuolla puolen oli taivaanvahvuus, planeetat ja tähdet. Aristoteleen luonnonfilofiassa veden höyrystyminen ja kohoaminen ylöspäin liittyi revontulien syntyyn höyryn syttyessä tuleen sen kohdatessa alkuaineen tuli. Näin revontulet ja monet muut ilmakehän valoilmiöt sijoitettiin aristoteliaanisessa luonnonfilosofiassa ylös taivaalle. Tästä tullee nimitys

meteoro - logica, koska *meteoros* tarkoittaa kreikankielessä *ylhäällä*. Meteorologian piiriin kuuuivat siis kaikki kuun alisessa maailmassa tapahtuvat ilmiöt ja niiden muutokset. Tästä alkuperästä on jäljellä termi *meteori*, joka alunperin on tarkoittanut kaikkia taivaalla näkyviä ilmiöitä, jotka eivät ole kuun ylisen avaruuden tapahtumia. Ilmatieteessä on ollut käytössä vielä 1950-luvulla esimerkiksi käsite *hydrometeori* (ANGERVO, 1948), joka on tarkoittanut kaikkia ilman kosteudesta johtuvia nestemäisiä tai kiinteitä olomuotoja. Saman *meteori*-sanan alle kuuluu tämänpäivän kielenkäytössä oleva ilmaisu *meteori*, joka tarkoittaa tähdenlentoa. Aristoteleen mukaan tähdenlennot ja revontulet ovat samoja ilman ja tulen kohtaamistuotteita, edelliset niiden nopeasti ohimeneviä ilmiöitä, jälkimmäiset hitaampia. Aristoteleen terminologiassa öisellä taivaalla näkyvistä revontulista käytetään nimitystä *chasmata*, joka tarkoittaa repeämää tai aukkoa. Ilmiön kuvaus liittyy eittämättä revontuliin jo niiden värien kautta, jotka Aristoteles kuvaa verenpunaisiksi liekeiksi.

Aristoteleen *Meteorologica*-teoksen mukaisessa ilmakehän ilmiöiden jaottelussa revontulet ovat yleensä kuuluneet modernimpana aikana meteorologisten laitosten tai vastaavien organisaatioiden havainto- ja tutkimusohjelmiin. Päivittäisten säähavaintojen yhteydessä on kirjattu myös illalla tai yöllä havaitut revontulet omana ilmatieteellisenä kohteenaan. Suomessa tällaisia havaintoja on tehty Turun Akatemian kaudelta lähtien 1740-luvulta aina 1960-luvun puoliväliin asti.

Mielenkiintoista on todeta kuinka aristotelinen näkemys revontulien ja tähdenlentojen samasta alkuperästä näkyy vielä 1800-luvulla tehdyissä revontulihavainnoissa. Niissä usein kirjattiin rinnan revontulien kanssa samanaikaisesti nähdyt meteorit kuten tehtiin Suomessa Turussa ja Helsingissä dokumentoiduissa revontulihavainnoissa (ARGELANDER[1], 1867; JOHANSSON[2], 1911).

Aristoteelista käsitystä revontuli-ilmiöstä osana laajaa maapallonlaajuista kokonaisvaltaista tapahtumaketjua maanpinnalta avaruuteen on pidettävä aikakautensa kunnioitettavana tiedefilosofisena saavutuksena. Tosin itse ilmiön tieteellinen selitys ei

[1] Friedrich W. Argelander (1799–1875) oli suomalais-preussilainen tähtitieteilijä. Hän oli tähtitieteen professorina Turun Akatemiassa ja Helsingin yliopistossa 1823–1837.
[2] Oscar Wilhelm Johansson (1878–1956) oli meteorologian professori Helsingin yliopistossa 1921–1948.

alkuunkaan vastaa nykyistä käsitystämme. Aristoteelinen maailmankuva maapallolla tapahtuvista ilmiöistä on täysin vapaa kaikenlaisesta metafyysisestä spekuloinnista syiden ja seurauksien suhteen toisin kuin oli vallalla keskiajan revontulikäsityksissä Euroopassa. Vastaavanlaiseen tiedonmuodostukseen ja synteesiin revontulista osana ilmakehän ilmiömaailmaa tapahtui vasta 1600-luvulla luonnontieteiden uudella nousukaudella yli 2000 vuotta Aristoteleen *Meteologica*-kirjan ilmestymisen jälkeen.

Aristoteleen käsitykset revontulista toistuvat roomalaisessa luonnonfilosofisessa kirjallisuudessa yli 300 vuotta myöhemmin. Plinius (vanhempi)[3] (23 e (23 eKr. –79 e 79 jKr.) kirjoitti niistä teoksessaan *Naturalis Historia* (vuodelta 77 jKr.) ja Seneca (nuorempi) (4 j) kirjoitti niistä teoksessaan *Naturalis Historia* (vuodelta 77) ja Seneca (nuorempi) (4 eKr. –65 j 65 jKr.) tutkimuksessaan *Naturales Quaestiones* (vuosilta 62–65 jKr.) (SCHRÖDER, 1984).

1.2 *Revontulet Keskiajalla*

Antiikin aikojen jälkeen luonnontieteiden kehitys pysähtyi lähes kokonaan yli tuhannen vuoden ajaksi. Keskiajalta tunnetaan eri lähteistä kuvauksia revontuli-ilmiöistä eri puolilta Eurooppaa (EATHER, 1980). Kyseessä ei kuitenkaan ole ollut ilmiön tieteellisistä selitysyrityksistä, vaan ne on yhdistetty erilaisiin uskonnollisiin ennemerkkeihin taivaalla (DALLOLMO, 1980). Huomiota herättävistä ja peloittaviksi koetuista revontulista Keski-Euroopan taivaalla kirjoitettiin lentolehtisissä tai sanomalehdissä laajasti (Kuva 1.1). Keskileveysasteilla revontulet ovat kohtalaisen harvinainen tapahtuma, jollaisia havaitaan keskimäärin muutamia kertoja auringonpilkkujen esiintymisien 11-vuotisessa vaihtelussa. Revontulien väri on silloin yleensä syvän punainen ja valomuodot ovat tavallisesti paikoillaan pysyviä taivasta laajalti peittäviä värimuodostelmia. Näky on ollut varmasti pelottava aikakauden taikauskoisessa käsitysmaailmassa.

[3] Plinius Plinius sai surmansa Vesuviuksen historiallisessa purkauksessa vuona 79 jKr. pur Pompeijin kaupunki tuhoutui.

1.3 *Revontulet luonnontieteiden nousukaudella 1600-luvulla*

1600-luvun alussa, kun optisin laittein tapahtuvat tähtitieteelliset havainnot pääsivät alkuun luonnontieteiden uuden nousukauden myötä, havainto-objekteiksi tulivat astronomisten kohteiden lisäksi muutkin taivaan valoilmiöt kuten revontulet.

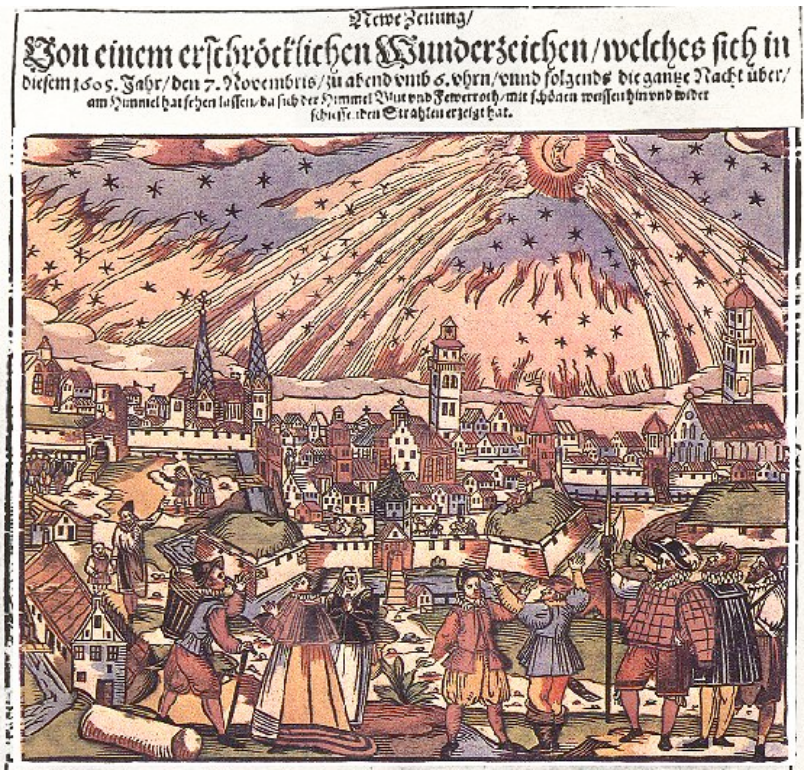
Pitkin Eurooppaa havaittu suuri revontulimyrsky syyskuussa 1621 kiinnosti aikakauden tutkijoita (EATHER, 1980). Muun muassa Galileo Galilei (1564–1642) ja hänen aikalaiskolleegansa ranskalainen filosofi ja astronomi Pierre Gassendi (1592–1655) havaitsivat ja tutkivat kyseistä ilmiötä. Gassendi kirjoitti kyseistä revontulista laajan tutkielman, jossa hän otti revontulista käyttöön termin *Aurora Borealis*, pohjoinen aamurusko (EATHER, 1980; SCHRÖDER, 1984; BONE, 2007), vaikka täyttä varmuutta asiasta ei ole. Joka tapauksessa termin valinta kertoo siitä, että revontulet ymmärrettiin tuolloin ilmakehän optisena ilmiönä sateenkaaren ja auringon ja kuun haloilmiöiden tapaan, joiden selitysmallit haettiin nopeasti kehittyvän geometrisen optiikan avulla valonsäteiden heijastus- ja taittumisilmiönä. Heijastusteoria esiintyy myös norjalaisessa myyttisessä tarustossa, saagassa, "*Kuninkaan peili*" (Kongespeilet) 1200-luvulta, jossa revontulia kuvataan pohjoisten merien jääkenttien kimalluksena (BREKKE and EGELAND, 1994).

Valonheijastusten lisäksi yleinen selitysmalli revontulille oli niiden väittäminen Islannin tulivuorten hohtaviksi purkaussavuiksi. Käsitys saattaa olla peräisin 1700-luvun lopulta, jolloin Islannissa purkautui yhtäaikaa useita tulivuoria, eniten kuin koskaan myöhemmin. Sarja savuavia, korkealle taivaalle kaasuja syökseviä tulivuoria, on varmaan ollut vaikuttava näky sen ajan ihmisille ja tieto tästä luonnonspektaakkelista levisi laajalle muuhun Eurooppaan.

Hyvin alkuun päässyt revontulien havainnointi ja tutkimus pysähtyi myöhemmin 1600-luvun puolivälissä. Tällöin revontulet kaikkosivat lähes tyystin Euroopan taivaalta likimain 50 vuoden ajaksi 1650–1700. Kyseinen ajanjakso liittyy auringon matala-aktiiviseen kauteen, joka näkyi auringonpilkkujen poikkeuksellisen vähäisenä

määränä ja myös revontulien niukkuutena erityisesti Keski-Euroopassa. Ajanjakso tunnetaan auringonpilkkujen esiintymisen Maunderin[4] miniminä.

Uudellen revontulitutkimus elpyi 1700-luvun alussa auringon aktiivisuuden kohotessa jälleen korkeaksi. Ensimmäinen suuri revontulinäytelmä tapahtui 17.3.1716, jolloin koko Euroopassa nähtiin loistavia revontulia aina Välimeren seutuja myöten. Tapahtuma herätti aikalaisissa ja tutkijoissa suurta mielenkiintoa ja aiheesta julkaistiin lukuisia tutkimuksia. Revontulet valoilmiönä olivat päässeet unohtumaan luonnontutkijoiden käsitemaailmasta kuten aiheesta kirjoittanut kuuluisa tähtitieteilijä Edmond Halleykin (1656–1742) toteaa tutkimuksessaan maaliskuun 1716 revontulista (HALLEY, 1719). Edellisestä koko Euroopan laajuisesti nähdystä voimakkaasta revontulimyrskystä oli silloin kulunut jo yli 100 vuotta.



Kuva 1.1. Piirros revontulista Nürnbergissä 7.11.1605 (nykyisen gregoriaanisen kalenterin mukaan 17.11.). Kuvatekstin mukaan revontulet olivat näkyvissä iltakuudesta läpi koko yön. Ilmiötä kuvaillaan pelottavaksi ihmemerkiksi. Kuvassa näkyvä revontulimyrsky havaittiin Euroopassa kirjallisten lähteiden mukaan myös Zürichissä, Mainzissa ja Pariisissa (FRITZ, 1873).

[4] E.W. Maunder (1851–1928) oli englantilainen astrofyysikko, joka tutki erityisesti auringonpilkkujen jaksollisia esiintymisiä. Hän kiinnitti huomiota 1900-luvun alussa 1600-luvun jälkimmäisen puoliskon vähäisiin auringonpilkkumääriin. Maunderin tutkimukset jäivät unohduksiin vuosikymmeniksi, mutta 1970-luvulla EDDY (1976) julkaisi ne uudelleen.

Maaliskuun 1716 revontulimyrskyn innoittamina monet tutkijat ryhtyivät keräämään vanhoja revontulihavaintoja ja seuraamaan revontulien esiintymisiä. Merkittävin 1700-luvun alun revontulitutkija oli ranskalainen J. de Mairan[5]. Hän kokosi suuren joukon revontulihavaintoja eri paikoista ja eri vuodenaikoina. Tulokset julkaistiin Pariisin Tiedeakatemian annaaleissa vuonna 1733 (De MAIRAN, 1733). Ehkä merkittävin havainto oli, että revontulien esiintymisessä on selvä vuodenaikais-vaihtelu, missä maksimit ovat tasauspäivien tuntumassa ja minimit seisauspäivien aikoihin. Kyseistä säännönmukaisuutta kutsuttiin yleisesti alan kirjallisuudessa de Mairanin säännöksi. De Mairan piti revontulia osana auringon ilmakehän ja maapallon magneettikentän kohtaamisena, mikä näkemys (sattumalta) oli lähempänä tämän päivän tieteen selitystä revontulille kuin niiden olemus ilmakehän optisen valoilmiönä kuten oli vallalla ollut näkemys 1600–1700-luvuilla (EATHER, 1980; SCHRÖDER, 1984).

De Mairanin revontulitutkimusten suuntaviivojen mukaisesti alan tutkimus pysyi samoilla periaatteilla seuraavat noin 150 vuotta. Revontulien olemuksen alkuperän selvittämiseksi niiden näkyvyydestä tehtiin havaintoja eri puolilla maapalloa eri vuoden- ja vuorokauden aikoina. Näin vähitellen hahmottui kuva revontuli-ilmiön jakautumisesta maapallolla paikka- ja aikaulottuvuuksissa. Selville saatiin myös pian, että revontulet ovat napaseuduilla lähes aina havaittava ilmiö pimeänä vuodenaikana. Eteläisen pallonpuoliskon revontulet saivat nimekseen *Aurora Australis*, eteläinen aamurusko, jonka nimityksen otti käyttöön kuuluisa etelämerien löytöretkeilijä James Cook (1728–1779) 1770-luvulla (BONE, 2007).

1.4 *Revontulihavaintojen alku Suomessa*

Suomessa revontuliavainnot aloitettiin säännöllisten meteorologisten havaintojen yhteydessä 1700-luvun puolivälissä. Aloitteentekijänä oli maineikas ruotsalainen tiedemies Anders Celsius[6], joka itsekin oli saanut merkittäviä uusia tuloksia revontulien ja magneettisten häiriöiden samanaikaisista esiintymisistä. Celsiuksen oppien

[5] Jean-Jacques d'Ortous de Mairan (1678–1771) oli ranskalainen tähtitieteilijä, meteorologi ja fyysikko. Hän oli sekä Pariisin että Ruotsin tiedeakatemian jäsen.

[6] Anders Celsius (1701–1744) oli ruotsalainen tähtitieteilijä, geomagnetismin ja revontulien tutkija Uppsalan yliopistossa.

mukaan Turun Akatemiassa aloitettiin säännölliset meteorologiset havainnot vuonna 1748 (SIMOJOKI, 1978; HOLOPAINEN, 2004). Satunnaisia meteorologisia mittauksia oli tosin tehty jo 1730-luvulla Turussa ja Torniossa (1737–1749), josta myös on olemassa revontulihavaintoja (HOLOPAINEN ja VESAJOKI, 2001).

Ruotsissa ja Suomessa vaikutti 1740-luvulta usean vuosikymmen verran eteenpäin Hyödyn aikakaudeksi kutsuttu tieteellinen ja yhteiskunnallis-taloudellinen ajanjakso (URPILAINEN, 2001). Edellisella vuosisadalla yliopistoissa vallalla ollut teologian ja humanismin ylivalta oli päättynyt ja tutkimuksen painopiste oli siirtynyt voimakkaasti luonnontieteiden puolelle kuten oli vallalla muuallakin Euroopassa. Toisaalta hyöty ymmärrettiin akateemisissa piireissä laveammin kuin vain välittömän taloudellisten intressien tavoitteleminen. Tutkimuksen tiedefilosofisena tavoitteena oli luonnon eri ilmentymien ymmärtäminen laajassa kokonaisuudessa. Näin saavutetaan laajempi ja syvällisempi tieto luonnon olemuksesta. Tähän päämäärään pyrkiminen edellytti ennenkaikkea luonnon tarkkailua, havaintojen tekoa ja kokeellista tutkimusta. Tällaisista tutkimuspäämääristä lähtien kertynyt luonnontieteellinen tieto osattaisiin paremmin muuttaa hyödyllisiksi taidoiksi ja tekniikoiksi. Meteorologisten ja geofysikaalisten systemaattisten havaintojen aloittaminen Ruotsissa ja Suomessa onkin nähtävä tällaisessa tiedefilosofisessa yhteydessä. Toisaalta kovin järjestäytynyttä ei 1700-luvun tutkimustoiminta ollut Suomessa, vaan Akatemiassa tutkimustyötä tehtiin muun opetustoiminnan ohella. Valtakunnallisesti meteorologinen havaintotoiminta sai kattavampia muotoja Suomen Talousseuran perustamisen (1797) myötä (SIMOJOKI, 1978).

Turussa säännöllisestä havaintotoiminnasta vastasi aluksi lääketieteen professori Johan Leche (1704–1764) ja myöhemmin muut professorit kuten esimerkiksi kuuluisa luonnontutkija Pehr (Pietari) Kalm (1716–1779) jatkoivat havainnontekoa. Merkittävin heistä oli fysiikan professori Gustaf Gabriel Hällström[7] (1775–1844), joka vaikutti Turun palon (1827) jälkeen Suomen Aleksanterin yliopistossa (Helsingin yliopistossa) edistäen maamme orastavaa meteorologista ja geomagneettista tutkimusta. Hällströmin kokoama revontulitilasto vuosilta 1748–1843 käsittää noin 700

[7] Hällströmistä lähemmin KLINGE (1997).

revontulihavaintoa (HÄLLSTRÖM, 1847). Se on ensimmäinen yhtenäinen havaintosarja revontulista Suomessa. Aihetta käsitellään lähemmin luvussa 3.1.

Suomen Tiedeseura (perustettu 1838) ja Helsingin yliopiston magneettinen observatorio (perustettu 1838) (nykyinen Ilmatieteen laitos) organisoivat maassamme laajan fenologisen havainto-ohjelman, joka käsitti paitsi meteorologisia havaintoja niin myös laajalti muita luonnonilmiöitä kuten esimerkiksi jäiden lähtöajat vesistöissä ja muuttolintujen lähdöt ja saapumiset. Ohjelman puitteissa kerättiin myös revontulitietoja. Niitä kertyi havaintokaudelta (1846–1855) noin 3000 kpl. Havaintoverkosto käsitti koko Suomen eteläarannikolta Utsjoelle asti. Ohjelma alkoi vuonna 1846 ja päättyi vasta 1870-luvulla, mutta tällöin jo huomattavasti supistuneella havainto-ohjelmalla (SIMOJOKI, 1978).

1800-luvun merkittävin revontulitutkija oli Helsingin yliopiston fysiikan professori Selim Lemström[8] (1838–1904). Lemströmin aikana tiedeyhteisö oli omaksunut uusia tieteellisiä teorioita, joissa sähköiset ja magneettiset voimat yhdessä valjastettiin erilaisten sähkömagneettisten geofysikaalisten ilmiöiden tieteellisen ymmärtämisen avuksi. Tällaisia ilmiöitä olivat esimerkiksi maapallon magneettisuus ja revontulet. Lemströmin teorioiden mukaan ilmakehän sähköisyys olivat syynä sekä revontuliin että salamointiin. Edelliset olivat nopeita sähköpurkauksia ja jälkimmäiset hitaita. Lemströmin teoria revontulista, joka joissain aikansa oppikirjoissa tunnettiin nimellä Edlund-Lemströmin -teoria, sai hyvän vastaanoton revontulitutkijoiden keskuudessa ja se vakiintui hyväksytyksi selitysmalliksi aina 1800-luvun loppuun saakka. Hänen revontuliteoriansa julkaistiin kirjana sekä ranskaksi että ruotsiksi (LEMSTRÖM, 1886). Niinpä esimerkiksi GÜNTHER[9] (1885) fysikaalisen maantiedon oppikirjassaan toteaa luvussa, jossa käsitellään revontulien syntyteorioita, että *...kehityskelpoisin kaikista revontuliteorioista on Edlundin[10]-Lemströmin teoria, joka vain joidenkin yksityiskohtien osalta tarvitsee tarkistamista ...* . Vähitellen revontulitutkimus kuitenkin kehittyi aivan toisille urille ja Lemströmin revontuliteoriat jäivät unohduksiin.

[8] Lemströmin töistä ja elämänvaiheista ovat kirjoittaneet HOLMBERG (1989) ja SEPPINEN (2004, 2006).
[9] Siegmund Günther (1848–1923) oli saksalainen maantieteilijä ja matemaatikko. Hän toimi maantieteen professorina Münchenin teknillisessä korkeakoulussa.
[10] Erik Edlund (1819–1888) oli Tukholman yliopiston fysiikan professori, jonka oppilaana Lemström oli 1860-luvulla (SEPPINEN, 2006).

Lemströmin ansioihin kuuluu myös observatoriotoiminnan organisoiminen Sodankylään Ensimmäisen kansainvälisen polaarivuoden ohjelman mukaisesti (1882–1883). Observatorion havainto-ohjelmaan kuuluivat meteorologiset, geomagneettiset havainnot ja revontulimittaukset. Lemströmin tutkimuksia ja Polaarivuoden saavutuksia käsitellään tarkemmin luvussa 3.3.

Eräs 1800-luvun revontulitutkimuksessa keskeinen kohde oli määrittää tarkasti revontulien esiintymiskorkeus. Tällaisia mittauksia tehtiin myös Lemströmin johdolla Lapissa, mutta heikoin tuloksin. Korkeusmittauksissa onnistuttiin vasta 1900-luvun alussa, kun valokuvauslaitteiden herkkyys mahdollisti revontulien systemaattisen kuvauksen samanaikaisesti useilta havaintopaikoilta. Tämän alan pioneeri oli norjalainen Carl Störmer[11], joka kehittämillään kameroillaan pystyi tarkasti määrittä-mään revontulien esiintymiskorkeudet (STÖRMER, 1955; BREKKE and EGELAND, 1994).

Muita 1800-luvun keskeisiä revontulitutkimuksen kohteita olivat revontulivalon spektroskooppiset mittaukset. Tyypillisen vihreän revontulivalon (aallonpituus 558 nm) alkuperä ei kuitenkaan selvinnyt kuin vasta 1920-luvulla. Revontulimuotojen luokittelu kuului myös 1800-luvun havainto-ohjelmiin.

Suomessa revontulikuvauksia tehtiin Störmer-kameroilla Sodankylän geofysiikan observatoriossa 1920- ja 1930-luvuilla (KATAJA, 1973). Uudelleen revontulien havainnointi alkoi Kansainvälisen geofysiikan vuoden aikana (1957–1958). Silloin Ilmatieteen laitoksen toimesta käynnistettiin revontulikuvaukset erikoisvalmisteisilla all-sky kameroilla Lapissa. Revontulikuvauksia on jatkettu näihin päiviin asti yli 50 vuoden ajan useilla asemilla Lapissa ja Huippuvuorilla osana Ilmatieteen laitoksen avaruustutkimuksen maanpintahavaintoja. Revontulikamerat ja kuvaustekniikat ovat muuttuneet useaan kertaan (esim. SYRJÄSUO, 2001a, 2001b).

Visuaalisia revontulihavaintoja Suomessa on lähes yhtäjaksoinen yli 200 vuoden

[11] Carl Störmer (1874–1957) oli norjalainen matemaatikko ja fyysikko. Hän laski auringosta tulevien elektronien liikeratoja maapallon magneettikentässä. Störmer kehitti merkittävästi revontulien kuvauksia korkeusmäärityksiä varten.

mittainen sarja eri puolilta maata. Havainnot alkavat vuonna 1748 ja jatkuvat synoptisilla sääasemilla systemaattisemmin vuodesta 1881 vuoteen 1964. Revontulikuvauksia on yli 50 vuoden ajalta vuodesta 1957 eteenpäin. Lähes kaikki aineisto on arkistoitu ja julkaistu tai saatettu kansainvälisten datakeskusten ja alan tiedeyhteisön käyttöön. Erityisen haluttuja datoja ovat olleet Polaarivuosien (1882–1883 ja 1932–1933), Kansainvälisen Geofysiikan Vuoden (1957–1958) ja Kansainvälisen Magnetosfäärivuoden (IMS; 1978–1979) aineistot.

Revontulihavaintojen ja -kuvauksien käyttö Suomessa tieteellisiin tutkimuksiin osana laajempaa lähiavaruuden tutkimusta käynnistyi kuitenkin vasta 1970-luvulla, jos Selim Lemströmin 1800-luvulla tehtyjä tutkimuksia ei huomioida. Ensimmäisiä kansainvälisisiä julkaisuja, joissa on käytetty Ilmatieteen laitoksen havaintoverkon tuottamia revontulikuvia osamateriaalina magnetosfääritutkimuksissa ilmestyi vuonna 1978 (PELLINEN and HEIKKILÄ, 1978). Myöhemmin revontulimateriaalia on hyödynnetty lukuisissa väitöskirjatöissä ja muissa julkaisuissa runsaasti. Nykyään Ilmatieteen laitoksen revontulikuvaukset yhdessä magneettikenttätietojen kanssa Nurmijärven observatoriosta ja IMAGE-verkon automaattiasemilta ovat kysyttyä ja arvostettua lähdemateriaalia kansainvälisessä avaruussäätutkimuksessa.

Tässä raportissa kuvaillaan revontulihavaintoja ja esitetään niiden perusteella revontuli-ilmiön vaihtelujen aikasarjoja yhdessä muiden avaruussäätä kuvaavien suureiden (magneettikentän häiriöisyys, auringonpilkut) kanssa.

2 REVONTULET KANSANPERINTEESSÄ

Pohjoisilla asuinsijoilla, lähellä napapiiriä eläneet kansat tunsivat hyvin revontuli-ilmiön ja siitä on heidän kansanperinteessään runsaasti erilaisia käsityksiä ja uskomuksia. Niitä on pidettävä esitieteellisten aikojen ihmisten selityksenä tälle luonnonilmiölle. Aihepiiristä on olemassa laaja kirjallisuus (EATHER, 1980; KAILA, 1998), mutta tässä yhteydessä revontuliuskomuksia käsitellään vain lyhyesti.

Revontulien ja niiden palamiseen liittyvistä nimityksistä tunnetaan Suomesta useita eri muotoja. Etelä-Pohjanmaalla ne ovat *rutjat* tai *Ruijan valkea*. Pohjois-Hämeessä revontulten loimuamista kutsutaan sanonnalla *välyt palaa* tai *pohjanen välyää*. Kankaanpäässä käytetty sanonta *pohjonen seilaa* kuvaa revontulikaaren hidasta nousua ylös taivaanlaelle, se näyttää tulevan kohti kuin suuri purjelaiva horisontin takaa. Lapin suomalaiset käyttävät revontulista nimeä *taivaanvalkeat*. Nykysaamessa revontulet ovat Oulun yliopiston saamenkielen professorin Pekka Sammallahden (1947–) mukaan *guovssahasat,* joka tarkoittaa kuukkeli-lintua. Voidaan ajatella, että sen kirjava höyhenpeite muistuttaa revontulien värien kirjavuutta ja kuukkelin vikkelä ja oikukas liikehdintä tuovat mieleen revontulien satunnaiset heilahtelut taivaalla.

Kaikilla pohjoisen napaseudun ja sitä reunustavien subarktisten kansojen asukkailla on omat nimityksensä revontulista. Ruotsiksi ne ovat *norrsken*, norjaksi *nordlys*, islanniksi *norðurljós,* viroksi *põhja valgus*, eskimokielellä *keoeeit* jne. Kaikissa Euroopan valtakielissä on revontulia kuvaava sana: esim. das *Nordlicht* saksaksi, the *Northern Lights* tai *Polar Lights* englanniksi. Näin useimmissa tapauksissa revontuliin liittyvä sana kuvaa revontuli-ilmiön visuaalista muotoa, pohjoisella taivaanrannalla hohtavaa öistä valoa.

Mistä sitten tulee suomenkielen revontulet? Itä- ja Pohjois-Suomen kansanperinteessä tulikettu eli tulirepo tai tulikko on myyttinen eläin, joka oli jokaisen metsästäjän salaisten toiveiden kohde. Sellaisen saaminen merkitsi jonkinlaista elämän päämäärän täyttymystä; tuliketun kaataja tulisi rikkaaksi ja kuuluisaksi. Salaperäinen korvessa lymyilevä ja kotiluolassaan hohtava kekälehäntäinen tulikettu on kuvattu myös Veikko Huovisen (1927–) romaanissa *Havukka-ahon ajattelija* (1961).

Kansanluulon mukaan ketunkarva aiheuttaa lämmöttömän valoilmiön koskettaessaan jotain esinettä. Käsitys ei ole aivan perätön, koska turkikset, staattisen sähkön varaajina, kipunoivat kosketettaessa niihin kuivalla ilmalla. Tämän tiedon perusteella pyrittiin taivaalla roihuavat revontulet selittämään Lapissa juoksentelevien tulirepojen aiheuttamiksi niiden kylkien iskiessä puihin tai hännän hipaistessa lumihankeen. Vastaavanlainen selitys revontulille tunnetaan Kanadan intiaaneilta, missä tuliketun

kipinöiden vastineena ovat Karibu-hirven (*Edthin*) turkista hangattaessa lähtevät säkeneet (EATHER, 1980).

Kansanrunouden tutkija ja akateemikko Martti Haavio (1899–1973) on tutkimuksessaan *Kansanomaisia käsityksiä revontulista* (1944) päätellyt, että tulirepo revontulien aiheuttajana palautuu Raamatussa Vanhan testamentin Jobin kirjassa kerrottuun tulta taivaalle syöksevään Leviatan-merihirviöön tai kipinöitä sylkevään mytologiseen petoon Behmuthiin, mikä kansan suussa vääntyi muotoon Peemutti. Erään kansanperinteen mukaan (Inkeri, Viro, Karjalan kannas, Etelä-Savo) revontulet aiheutuvat Jäämeressä teiskaavasta Leviatan-valaskalasta, jonka karvaisista turkissuomuista auringon valo heijastuu taivaalle loimuavina revontulina. Revontulien selittäjänä valaskala vaihtui suomalaisille eränkävijöille tutumpaan tulikettuun. Revontuli-nimen yleistyminen on siis ilmeisesti tapahtunut kristillisellä ajalla Raamatusta saadun selitysmallin mukaan. Leviatanin suusta pursuavat tulisoihdut muuttuivat tulirevon karvoista kariseviin kipunoihin. Näin kansa on nähnyt arvokkaimman turkiseläimensä vastineen Raamatun petojen kuninkaassa, joka säihkyy tulirevon lailla.

Kalevala, jonka runoaineksen pääosan synty ajoittuu pakanallisen ja kristillisen ajan taitekohtaan 1200–1300-luvuille, tuntee myös revontulet; niihin viittaavia mainintoja on olemassa, mutta "revontuli" sanana on tuntematon. Niihin viitataan käyttämällä esim. nimitystä Pohjolan Portit, mikä kuvastaa pohjoisella taivaalla loistavaa revontulikaarta, revontulien esiintymisen perusmuotoa. Kalevalassa (POLTTILA, 1982) kirjoitetaan mm.:

> *Portit Pohjolan näkyvi,*
> *Paistavi pahat veräjät,*
> *Kannet kirjo kiimottavat*.

Tverin-Karjalan murteessa revontulista käytetään vieläkin portin pieliin viittaavaa ilmaisua *tuliset patsaat* (tulizet pattsahat).

Revontulien merkitystä kalevalaisessa perinteessä on tulkinnut kirjailija Brita Polttila (1920–2008) "*Pohjan Portit*"-kirjassaan (1982). Hänen mukaansa revontuli-nimi ei tulekaan revosta, ketusta, vaan kansatieteilijä Lauri Kettusen (1885–1963) tutki-

muksiin vedoten, kysymyksessä on metsäsuomalaisten loitsujen luvuista, joita "luetaan" eli repoitellaan. Kenties taivaalla muinoin loimusivatkin *repointulet*, loitsutulet?

Revontulien kaksi tyypillistä väriä: kelmeän vihreä ja verenpunainen valo ovat kiihottaneet pohjoisten alueiden ihmisten mielikuvitusta. Kalpea vihreä hohto on liitetty vainajiin. Grönlannissa eskimot kuvittelevat revontulien loimotuksen (*aksarnirq*) olevan kuolleiden lasten sieluja, jotka kisailevat keskenään taivaalla. Skotlannissa tunnetaan revontulista edellistä hilpeämpi nimitys *Merry Dancers* - iloiset tanssijat. Pohjois-Venäjällä vastaava ilmaisu on *saluny* - telmijät. Punainen hehku on joidenkin mielessä heijasteli taisteluissa kuolleiden sotilaiden henkien kamppailua jättiläisten kanssa. Tästä teemasta tunnetaan erilaisia muunnelmia arktisten kansojen keskuudessa (EATHER, 1980).

Keski- ja Etelä-Euroopassa, missä revontulet ovat suuria harvinaisuuksia, niiden esiintymisessä nähtiin taivaallisia ennusmerkkejä tulevista kauheuksista, sodista ja muista mullistuksista. Eteläisillä leveysasteilla revontulet esiintyvät lähes aina voimakkaan punaisina, joten niiden liittäminen taistelutantereilta heijastuviin hurmekenttiin tuntui aivan selvältä. Vielä niinkin myöhäiseltä ajalta kuin viime vuosisadan lopulta tunnetaan Preussista maininta vuosien 1870–1871 mahtavista punaisista revontulista, että ne ovat Saksan-Ranskan sodan rintamilta kohoavan veren hehkuvia kuvajaisia. Isonvihan (1713–1721) ajalta tunnetaan vastaavanlainen vertaus Suomesta. Se saattaa liittyä suurta kohua aiheuttaneisiin maaliskuun 1716 revontuliin, jotka havaittiin kaikkialla Euroopassa Roomaa ja Ateenaa myöten. Aiheesta julkaistiin ajan tavan mukaan lukuisia arkkikirjoituksia, joissa revontuli-ilmiötä pidettiin tuonpuolisen maailman merkkinä, jonka tarkoituksena oli johdattaa ihmiset hengelliseen katumukseen ja parannukseen.

Mielenkiintoinen ja havainnollinen kuvaus revontulista on Aleksis Kiven romaanissa "Seitsemän veljestä":

Jukolan veljekset katselivat monena talviyönä Impivaaran pienestä akkunanlävestä *kelmeitten revontulten välkkynätä pohjosessa*. He näkivät, miten *...vuoren harjulla, partaisten kuusten takaa, kajasti kauas-haamoittava kaari. Siellä säihkyen ja äänetönnä soitto syttyi ja sammui ja syttyi taasen, tuli tulta ajeli, ehtien aina Pohjan valjulta portilta ylös korkeuden kumoon, ja välimmiten vavahteli ympäri taivasta*

himmeä valo. Tuotapa leikkiä katselivat veljekset pirttinsä parvelta, ihmetellen ja arvellen tuonne, tänne tämän juhlallisen ilmiön alkua ja syytä. Mutta he arvelivat ja tuumiskelivat turhaan. (Aleksis Kivi, Kootut teokset I, Seitsemän veljestä, IX luku).

Sitaatti Seitsemästä veljeksestä osoittaa, että revontulet olivat tuttu ilmiö Kivelle, niin tarkasti hän kuvaa tulimuotojen dynaamiset muutokset ns. revontulimyrskyn aikana - käyttääkseni tämän päivän revontulitutkimuksen termistöä - jolloin revontulihehku rauhallisesta kaarimuodosta, Pohjan Portista valjulla taivaalla pohjoisessa, nousee kohti taivaan lakea useissa aaltoilevissa ja kirkkauttaan nopeasti muuttavissa nauhamaisissa muodostelmissa. Tulimuotojen loimunta on todella kuin *tuli tulta ajelisi*. Kivi on noita taivaan valoja nähnyt kotiseudullaan Nurmijärvellä, siis Etelä-Suomessa, joten revontulet eivät esiinny yksinomaan Lapin asukkaiden öiden valoina, joskin napapiirin pohjoispuolella ne ovat lähes jokaöisenä vieraana, kun taas Etelä-Suomessa saattaa kulua vuosia ilman minkäänlaista revontulien välkähtelyä.

Revontuliin liittyy maallikoiden keskuudessa kaikenlaisia uskomuksia ja virheellisiä käsityksiä kuten esimerkiksi:

- Revontulia voi nähdä vain pakkasella
- Revontulet rätisevät
- Revontulia näkee parhaiten keskitalvella

Pakkasten ja revontulien yhdistäminen toisiinsa saa luonnollisen selityksen siitä, että edellytys revontulien näkemiselle on kirkas pilvetön taivas. Kun talvellä sää on selkeä, on myös usein pakkanen kovimmillaan. Väite liittyy läheisesti myös uskomuksiin revontulien vaikutuksesta säähän yleensäkin. Lapissa revontulia on paikoin pidetty kesän ukonilmojen talvisena vastineena. Tieteellinen revontulitutkimus ei kuitenkaan ole löytänyt mitään fysikaalista yhteyttä tai tekijää toisaalta revontuli-ilmiön toisaalta säätapahtumien välille.

Revontulien väitetty rätinä tai muut äänet ovat hyvin yleisiä uskomuksia kaikkialla, missä revontulia nähdään (SILVERMAN and TUAN, 1973; KAILA, 1998). Taivaan ollessa mahtavasti loimuavien revontuliliekkien peitossa, saattaa helposti syntyä mielikuva nuotiotuliin tai tulenlieskoihin yleensäkin, joihin liittyy erottamattomasti tulen rätinä. Ehkä ihminen mielikuvituksessaan lisää puuttuvan äänisignaalin

revontulien palaessa taivaalla, ja jälkeenpäin kuviteltu ääni tuntuukin jo todelliselta. Ilman tiheys revontulien esiintymiskorkeudella on niin tavattoman pieni, ettei ihmiskorvan kuultavia ääniä sieltä voi välittyä. Kirkkaat revontulivalot ja niiden nopeat liikkeet saattavat silmä-ärsytyksen kautta käynnistää tiettyä kuuloa aktivoivia fysiologisia reaktioita, jotka saattavat aiheuttaa kuuloelimiin tinnitystä, vinkunaa.

Revontuliin liittyviä ääniä on mitattu erilaisin mikrofonijärjestelmin. 1960-luvulla WILSON (1967) vangitsi ääniaaltoja nopeasti liikkuvien revontulien ollessa taivaalla. Kyseessä oli kuitenkin infrasonisia akustisia aaltoja, jollaisia ei ihmiskorva lainkaan pysty kuulemaan. Tällainen ääniefekti syntyy revontulikaaren liikkuessa yliäänennopeudella, jolloin se aikaansaa shokkirintaman, joka etenee kaaren liikesuunnassa.

Eräs mahdollisuus revontuliin liittyvien äänien syntyyn ovat niin sanotut koronapurkaukset, jotka voivat syntyä revontuliin liittyvien sähkökenttien purkautuessa lähellä maanpintaa erilaisten teräväkärkisissä esineissä (KAILA, 1998).

Teknillisen Korkeakoulun akustiikan laboratorion laitteilla on tehty usean vuoden ajan äänimittauksia voimakkaiden revontulien aikaan erikoisherkillä mikrofoneilla. Saadut tulokset ovat lupaavia, mutta lopullista selvyyttä äänikysymykseen ei ole vielä saatu (LAINE et al., 2001). Revontuliin liittyviä ääniä on yritetty mitata myös Oulun yliopiston Sodankylän geofysiikan observatoriossa, mutta tulosten analysointi on vielä kesken.

3 REVONTULITILASTOJA 1700–1900 -LUVUILTA

Revontulitilastot 1700- ja 1800-luvuilla perustuivat revontulien visuaaliseen havainnointiin. Havainnot tehtiin tavallisesti säähavaintojen yhteydessä yleensä illalla kello 18–22 paikallista aikaa. Niistä merkittiin muistiin havaintovihkoihin kellonaika ja joskus lyhyt kuvaus revontulien muodoista tai voimakkuudesta. Tilastot yhdeltä havaintopaikalta muodostuvat päivästä toiseen etenevistä aikasarjoista, joissa ne vuorokaudet, jolloin revontulia on havaittu saavat lukuarvon 1. Muut päivät ovat nollia. Usein päiväarvoista on laskettu kuukausi- tai vuosisummat, jolloin tilasto kertoo kuukauden tai vuoden tasolla revontuliöiden yhteenlasketun määrän.

Visuaalinen revontulihavainto antaa tietysti varsin puutteellisen kuvan revontulien esintymisfrekvensseistä. Havainnot ovat subjektiivisia ja havaitsijan tarkkaavaisuudesta ja huolellisuudesta riippuvaisia. Aina ei voi tietää onko puuttuva havainto jäänyt tekemättä vai onko kyseessä vain revontuliton taivas. Pilvisyys on tietysti haittatekijä revontulien havaitsemisessa. Revontulien esiintymisfrekvenssi kasvaa voimakkaasti leveysasteen funktiona etelästä pohjoiseen mentäessä. Tällöin eri paikkakunnilla tehtyjä havaintoja on vaikea verrata toisiinsa summamäärien osalta.

Jo ennen 1700-luvun puoliväliä oli tunnettua, että voimakkaiden revontulien yhteydessä maapallon magneettikenttä oli häiriöisessä tilassa, mikä havaittiin esimerkiksi kompassineulan epäsäännöllisistä ja nopeista liikkeistä. Havainnon julkaisivat Anders Celsius ja hänen assistenttinsa Olaf Hiorter Uppsalassa vuonna 1740 (CELSIUS, 1740; CHAPMAN and BARTELS, 1940; EATHER, 1980).

Sekä revontulet että magneettiset häiriöt ovat avaruussääilmiöitä, jotka tapahtuvat maapallon magnetosfäärissä ja ionosfäärissä. Ne saavat alkunsa auringon aktiivisuuspurkauksista. Revontulien esiintymisien havaintosarjat ovat yleensä ajoittaisia ja rajoittuvat vain pimeään vuodenaikaan. Magneettikentän havainnot ovat taas jatkuvia (1800-luvun puolivälistä lähtien) ja niiden maantieteellinen kattavuus on laajempi kuin revontulihavainnoissa. Pilvisyys ei ole esteenä magneettikentän muutosten havainnointiin kuten revontulien osalta on laita. Näin magneettikentän havaintosarjat antavat objektiivisemman ja ajallisesti yhtenäisemmän kuvan niiden avaruussääprosessien vaihteluista, jotka aiheuttavat myös revontulia. Magneettikentän mittaustuloksia ja revontulihavaintojen määriä verrataankin usein toisiinsa. Vertailun helpottamiseksi magneettikentän vaihtelut muutetaan magneettikentän yksiköistä tiettyihin standardisoituihin indekseihin, jotka luonnehtivat muutosten voimakkuutta tietyissä aikaväleissä (tunti, vuorokausi jne.). Pisin yhtenäinen magneettikentän häiriöisyyttä kuvaava indeksisarja tunnetaan nimellä *aa*-indeksi (MENVIELLE and BERTHELIER, 1991; NEVANLINNA, 2009a, 2009b). Se kuvaa magneettikentän globaalia häiriöisyyttä kolmen tunnin jaksoissa vuodesta 1868 lähtien. Indeksin vuorokausi, kuukausi ja vuosikeskiarvot kertovat magneettikentän häiriöisyyden

vaihteluista näissä jaksoissa. Tässä raportissa on kyseistä indeksisarjaa käytetty revontulihavaintojen aikasarjojen vertailukohteena useilla eri aikaväleillä.

3.1 *Hällströmin revontulitilasto 1748–1843*

Kuten johdannossa on mainittu, fysiikan professori G.G. Hällström kokosi yhteen Turussa ja Helsingissä tehdyt revontulihavainnot 1748-1843. Turun kausi päättyi vuoteen 1828, jolloin Turun Akatemia siirrettiin Helsinkiin Suomen Aleksanterin yliopiston nimellä. Hällström itse vastasi havainnoista Helsingissä, joita hän suoritti lähes kuolemaansa (1844) saakka. Havainnot on tehty meteorologisten havaintojen ohella, jolloin havaintovihkoon on kirjoitettu maininta revontulien näkyvyydestä ja joskus myös luonnehdinta niiden voimakkuudesta. Revontulihavainnot kertovat siis illalla kello 20–21 aikaan nähdyistä revontulista. Hällström julkaisi havainnoista latinankielisen tutkimuksen *De Apparitionibus Aurorae Borealis in Septentrionalibus Europae Partibus* (Revontulien esiintymisestä Euroopan pohjoisosassa), joka ilmestyi vuonna 1847 Suomen Tiedeseuran annaaleissa. Tässä julkaisussa on koottuna kunkin kuukauden revontuliöiden lukumäärä. Myöhemmin Hällströmin alkuperäisestä aineistosta on eritelty päivämäärätiedoilla ne yöt, jolloin revontulia on nähty (JOHANSSON, 1911). Päivämäärät ovat tallella vain Turussa tehdyissä havainnoissa (1748–1828).

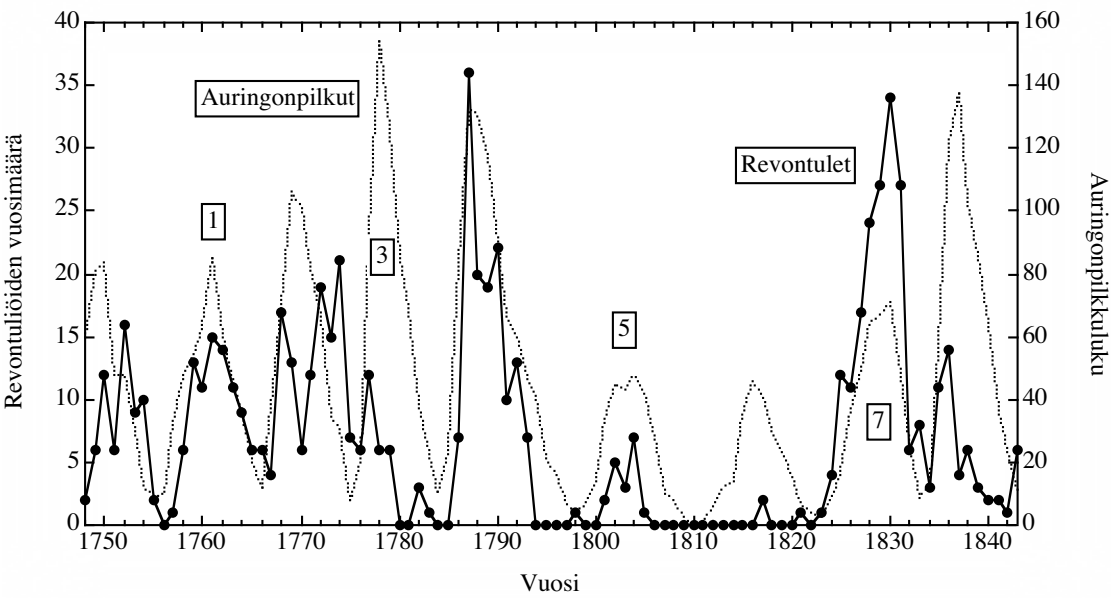
Turun Akatemian ja sittemmin Helsingin yliopiston tähtitieteen professori Friedrich Argelander[12] (1799–1875) teki Hällströmin havainnoista riippumattomia revontulihavaintoja Turussa ja Helsingissä 1823–1837 (ARGELANDER, 1867).

Kuvassa 3.1 on esitetty Hällströmin revontulihavainnot yhdessä auringonpilkkulujen kanssa. Ne seuraavat varsin hyvin pilkkuluvuilla mitattua auringon aktiivisuutta kuten on tunnettua muista vastaavista havaintosarjoista.

Hällströmin havaintosarja sattuu mielenkiintoiseen auringon aktiivisuuden periodiin, jota kutsutaan Daltonin[13] minimiksi (noin 1795–1825) auringonpilkkujaksojen 5 ja 6

[12] Argelander siirtyi vuonna 1837 Helsingistä Saksaan Bonnin tähtitornin johtajaksi. Siellä hän johti tähtiluetteloiden kuvauksia ja perusti kansainvälisen Tähtitieteellisen yhdistyksen.
[13] John Dalton (1766–1844) oli englantilainen luonnontutkija ja kemisti. Hän todisti materian atomiluonteen

aikana. Tuolloin auringonpilkkujen esiintyminen oli niukkaa eikä revontulia nähty Turussa lainkaan vuoden 1805 helmikuun ja vuoden 1817 helmikuun välisenä aikana. Molemmat auringonpilkkujaksot (4 ja 7) ennen ja jälkeen Daltonin minimin olivat keskimääräisiä auringonpilkkujaksoja selvästi voimakkaampia, mikä näkyy myös runsaina revontulihavaintoina (Kuva 3.1).



Kuva 3.1. Pallot: Hällströmin revontulitilasto. Revontulien vuotuinen lukumäärä 1748–1843. Katkoviiva: Auringonpilkkuluku (vuosiarvo). Laatikoitu numero on auringonpilkkujakson järjestysluku.

HÄLLSTRÖM (1847) itse toteaa tämän poikkeuksellisen tilanteen näin:

Olemme koonneet Turussa 1748–1828 ja täällä Helsingissä 1829–1843 tehdyistä meteorologisista havainnoista tiedot revontulien esiintymisistä ja toivomme niiden jollain tavoin valaisevan kyseistä ilmiötä 60 leveysasteen osalta. Olemme kuitenkin jättäneet luettelosta pois ne vuodet, joilta ei ole olemassa muistiinpanoja, epäilemättä siksi, ettei revontulia ole esiintynyt lainkaan. Huomionarvoinen on tässä suhteessa vuosien 1805 ja 1823 välinen jakso, josta havainnot puuttuvat lähes tyystin. Tilanne on ollut vastaava koko Euroopassa kuten ilmenee asiaa koskevista tutkimuksista. ... (käännös Leena Talvio).

Keski-Euroopan taivaalta revontulet katosivat kokonaan yli 30 vuoden ajaksi 1793–1824, vaikka niitä esimerkiksi 1780-luvulla havaittiin noin 5 kertaa vuodessa (FRITZ, 1873). Kokonaan eivät revontulet kuitenkaan kadonneet Daltonin minimin aikana, vaan revontulivyöhyke oli vetäytynyt tavallista pohjoisemmaksi. Niitä nähtiin pohjoisilla leveysasteilla (> 65° N) Daltonin minimin alku- ja loppuvuosina noin kolmannes vähemmän kuin mitä yleensä auringonpilkkujaksojen aikana kuten voi

päätellä esim. RUBENSONin (1879, 1882) revontulikokoelmasta. Daltonin minimin syvimmän vaiheen aikana 1808–1810 revontulia esiintyi pohjoisessa (> 65° N) alle 10 kertaa vuosittain, kun tavallisina minimikausina vastaavat esiintymismäärät olivat 1700-luvun lopulla ja myöhemmin 1800-luvulla useita kymmeniä.

Hällström käsittelee julkaisussaan myös revontulivaihtelun vuodenaikaista jaksollisuutta taulukoimalla kumulatiivisiksi kuukausisummiksi kaikki 682 revontulihavaintoa koko havaintokaudelta. Hänen tarkoituksenaan oli vahvistaa Suomen havainnoista de Mairanin nimellä tunnettu revontulien esiintymisen vuodenaikaisvaihtelu, missä maksimit sattuvat tasauspäivien tuntumaan ja minimit seisauspäivien lähelle. Hällström sovitti kuukausiarvoihin Fourier-sarjan:

$$A(t) = a_o + \sum_{n=1}^{N} a_n \sin(\frac{360°}{T} nt + \varphi_n) \qquad (3.1)$$

missä A on revontuliöiden kuukausimäärä, t aika kuukausina, a_n jaksollisen vaihtelun amplitudi, T periodi ja φ_n vaihekulma. Hällströmin tarkastelussa perusjakso T on vuosi eli 12 kk. Näin kolmesta ensimmäistä aallosta muodostuu sarja:

$$A(t) = a_o + a_1 \sin(30°t + \varphi_1) + a_2 \sin(60°t + \varphi_2) + a_3 \sin(90°t + \varphi_3) \qquad (3.2)$$

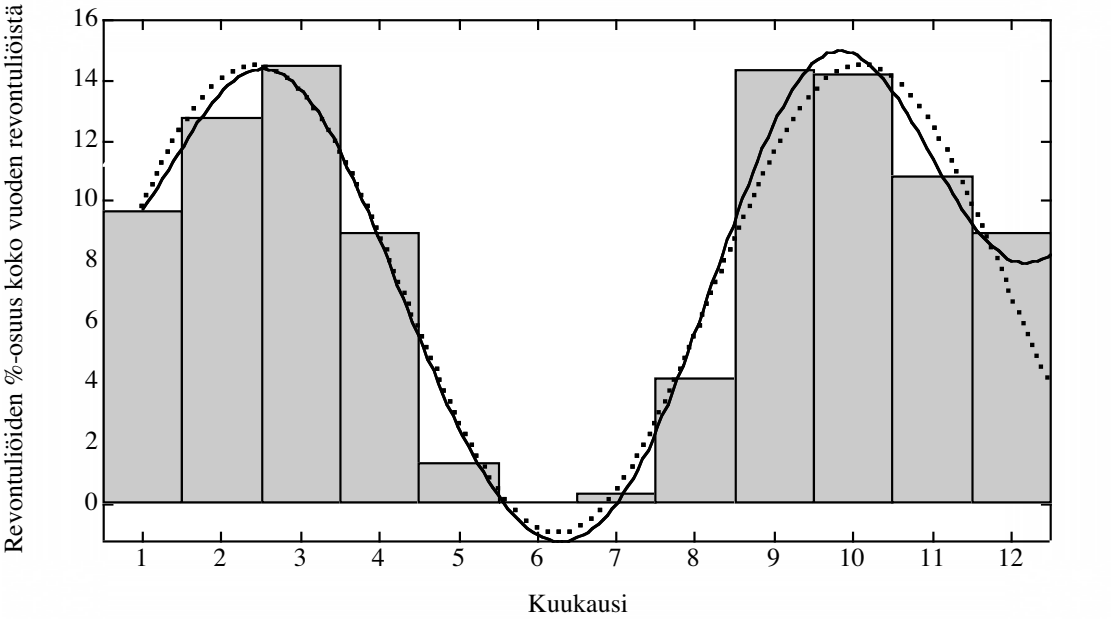
missä summan ensimmäinen termi on vakio, seuraavina ovat vuosiaalto, puolivuosiaalto ja kolmannesvuosiaalto (kts. myös NEVANLINNA, 1995). Hällström sai amplitudeille arvot a_o = 8.33, a_1 = 5.40, a_2 = 4.97 ja a_3 = 0.83, missä luvut ovat prosentteja, kun havaintojen kokonaismäärä (682) normitetaan lukuun 100. a_o on kuukausittainen keskiarvo koko vuodelta. Revontulien esiintymisien maksimit sattuivat tämän analyysin mukaan päivämäärille 1.III ja 11.X ja minimit 25.VI ja 20.XII. Nykyisen tiedon mukaan vuodenaikaisvaihtelussa avaruussäähäiriöiden (esim. revontulet ja magneettiset häiriöt) maksimien ja minimien paikat määräytyvät Russell-McPherron -mallin mukaan maapallon dipoliakselin ja maa-aurinko -koordinaatiston välisestä kulmasta siten, että maksimit osuvat päiville 5.IV ja 5.X ja minimit 5.VII ja 5.I., jolloin kulma on suurimmillaan (RUSSELL and MCPHERRON, 1973; HÄKKINEN et al., 2003). Ääriarvot sattuvat siis noin kaksi viikkoa tasaus- ja seisauspäivien jälkeen.

Tasauskuukausina vuotuisista revontuliöistä nähdään noin 15 %, mutta talvipäivän seisauskuussa vain noin 9 %. Keskikesällä ei revontulia voida juuri havaita valoisien öiden vuoksi, vaikka silloinkin revontulia esiintyy kuten muista eteläisempien leveysasteiden tilastoista tiedetään.

Hällströmin kolmen aallon Fourier-esityksen sijaan kävisi revontulivaihtelun approksimaationa yhtä hyvin yksi ainoa aalto, kuten Kuvasta 3.2 voi päätellä:

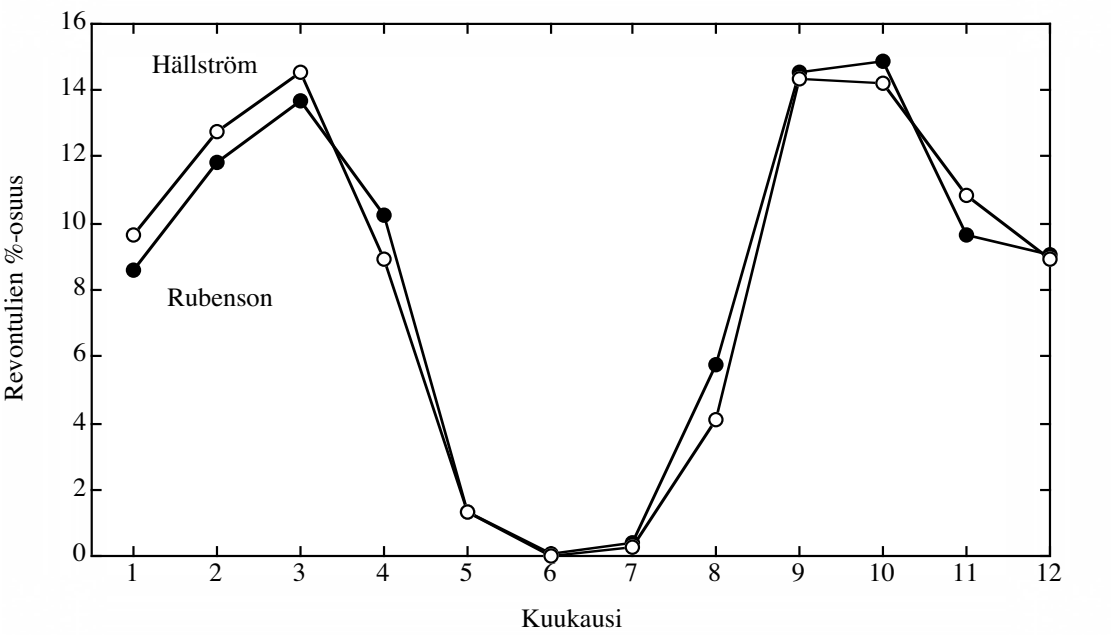
$$A(t) = a + b\sin(\frac{360°}{T}t + \varphi) \tag{3.3}$$

jos optimoidaan vakiokertoimet (a, b), aallonpituus (T) ja vaihekulma. Tulos on lähes identtinen Hällströmin summakäyrän (3.2) kanssa. Tässä approksimoinnissa a = 6.77, b = 7.75 ja T = 7.7 kk. Hällströmin aikana käsin tehtävien laskujen aikakautena ei kuitenkaan ollut yksinkertaisia numeerisia keinoja yhtälön (3.3) vakioiden optimointiin pienimmän neliösumman keinolla.



Kuva 3.2. Histogrammi: Hällströmin revontulitilaston 1748–1843 revontulimäärät koottuna kuukausi-summiksi. Kuukausilukema ilmoittaa revontulien esiintymisprosentin koko vuoden tilastossa.
Viiva: Hällströmin kolmen harmonisen aallon Fourier-sovitus kuukausiarvoihin (yhtälö 3.2).
Katkoviiva: Siniaallon (yhtälö 3.3) sovitus revontulien kuukausiarvoihin.

Kuvassa 3.3 on vertailu Hällströmin revontulitilaston ja Ruotsissa tehtyjen revontulihavaintojen kanssa. Kyseessä on RUBENSONin[14] (1879, 1882) kokoama revontulien havaintoaineisto leveysasteväliltä 58°–61° N, joka suunnilleen vastaa Hällströmin havaintopaikkojen Helsinkiä ja Turkua. RUBENSONin tilasto käsittää 4290 revontulihavaintoa vuosilta 1721–1877, jotka Kuvassa 3.3 on jaettu eri kuukausille. Aineisto on koottu jälkeenpäin erilaisista kirjallisistä lähteistä kuten sanomalehtien uutisista yms. Nähdään, että yhteensopivuus näiden kahden tilaston välillä on erittäin hyvä.



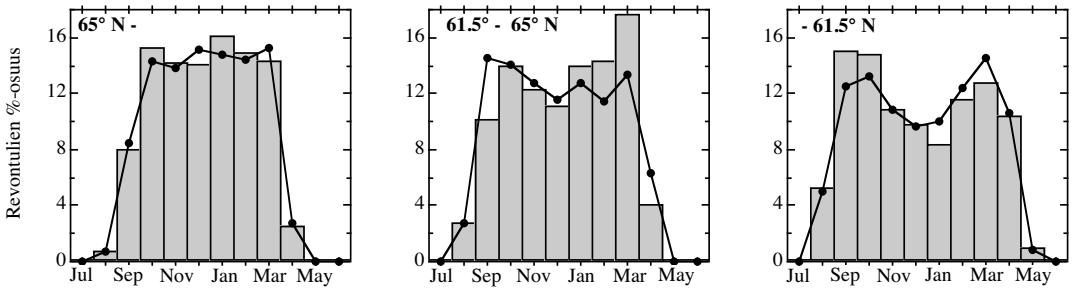
Kuva 3.3. Revontulien kuukausittaiset esiintymisfrekvenssit prosentteina koko vuoden revontulimäärästä. Ympyrät: HÄLLSTRÖMin (1847) tilasto Turusta ja Helsingistä, Pallot: RUBENSONin (1879, 1882) tilasto Ruotsista leveysasteilta (58° - 61° N).

Kuva 3.4 täydentää Hällströmin revontulitilastoa vastaavilla havainnoilla Ruotsista (RUBENSON, 1879, 1882) ja Norjasta (TROMHOLT[15], 1902), mutta eri leveysasteilta: > 65°N (kuva 3.4a), 61.5°–65° N (Kuva 3.4b) ja < 61.5° N (Kuva 3.4c). Kuvassa revontulien kuukausittainen esiintymisfrekvenssi pohjoisimmassa alueessa (Kuva 3.4a) on suunnilleen sama lokakuusta maaliskuulle eikä eteläisimmille leveysasteille tyypillistä kevät- ja syksymaksimia eikä joulun ajan minimiä ole havaittavissa. Selitys

[14] Robert Rubenson (1829–1902) oli Ruotsin Meteorologisen keskuslaitoksen johtaja (1873) ja Uppsalan yliopiston meteorologian professori (1870). Hän osallistui aktiivisesti I Polaarivuoden (1882–1883) organisointiin.

[15] Sophus Tromholt (1856–1896) oli norjalainen revontulitutkija. Hänen johdollaan tehtiin useita satoja revontulihavaintoja Finnmarkin alueella 1880- ja 1890-luvuilla.

on siinä, että vuodenaikaisvaihtelun vähäaktiivinen vaihe talvipäivän seisauskuukauden tuntumassa joulu-tammikuussa supistaa revontulivyöhykkeen pohjoisimmille leveysasteille, jolloin pohjoisessa nähdään suunnilleen saman verran revontulia syys- ja talvikuukausien aikana. Valoisat yöt vähentävät alkusyksyn ja kevään revontulihavaintoja. Alueen eteläosissa ei sydäntalven aikana nähdä revontulia yhtä usein kun pohjoisessa revontulivyöhykkeen supistuttua kauas pohjoiseen. Näin revontulien esiintymisprosentti laskee noina kuukausina. Esiintymisprosentti etelässä nousee tasauskuukausien aikana, jolloin aktiiviset revontulet esiintyvät etelämpänä revontuliovaali laajentumisissa (Kuva 3.4b). Kaikkien eteläisimmällä alueella (Kuva 3.4c) tasauskuukausien maksimit ovat voimakkaimmat ja joulu-tammikuun minimi syvä.



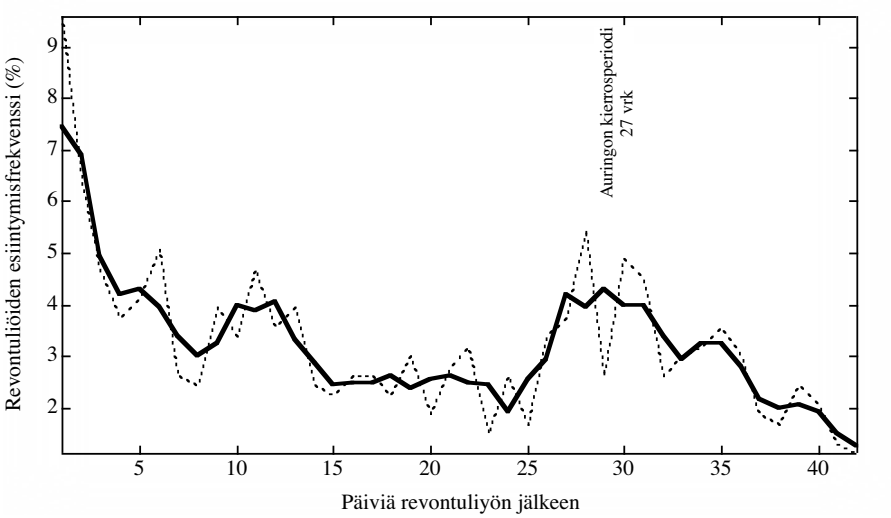
a. b. c.

Kuva 3.4. Histogrammipylväät: Revontulien vuodenaikaisvaihtelu Ruotsissa (1721–1877) (RUBENSON, 1879) kolmella eri leveysastevyöhykkeellä pohjoisesta etelään: > 65° N (a), 61.5°– 65° N (b) ja < 61.5° N.
Palloviiva: Vastaavat revontulet Norjassa (1767–1878) (TROMHOLT, 1902).

Elokuussa ja toukokuussakin on revontulia havaittu, mitä pohjoisemmilla leveysasteilla ei juurikaan ole valoisien öiden vuoksi.

HÄLLSTRÖMin (1847) revontulitilastosta on johdettavissa auringonpilkkujakson mukaisia vaihteluja sekä vuodenaikaisperiodisuus, kuten yllä on kuvailtu. Aineistosta päästään myös vielä lyhyempään jaksollisuuteen, joka liittyy auringon pyörähdysajan (noin 27 vrk) mittaiseen säännölliseen vaihteluun. Auringon aktiivisen alueen ollessa maahan nähden edullisessa paikassa (yleensä auringon keskimeridiaanista hieman länteen) sieltä lähtevät hiukkasemissiot osuvat maapallolle ja aiheuttavat magneettisia häiriöitä ja voimakkaita revontulia. Yhden auringon rotaation (27 vrk) jälkeen sama alue on uudelleen geoefektiivisessa paikassa ja sama häiriö toistuu. Näin voi tapahtua jopa useiden auringon rotaatioiden ajan kuten tunnetaan hyvin magneettisista rekiste-

röinneistä jo 1800-luvulta. Samoilta ajoilta on peräisin havainto siitä, että myös tavanomaista voimakkaimpien revontulien esiintyminen noudattaa 27 vrk rytmiä varsin säännöllisesti (ARRHENIUS, 1903). Erityisen pysyvä piirre tämä on auringonpilkkujen laskevalla kaudella, jolloin auringon korona-aukot, jotka ovat aktiivisen aurinkotuulen lähteitä, pysyvät stabiileina useita viikkoja ja aiheuttavat avaruussäähäiriöitä maapallon lähiavaruudessa. Kuvassa 3.5 on tilastoitu kuinka usein tietyn revontuliyön jälkeen havaitaan uudelleen revontulia. Yleisesti ottaen todennäköisyys pienenee mitä kauemmas ajassa etäännytään. Kuitenkin 27–29 vrk jälkeen esiintymistodennäköisyys kasvaa selvästi, mikä siis liittyy auringon rotaatioon sidottuihin häiriölähteisiin.



Kuva 3.5. Revontulien esiintymisprosentti tietyn revontuliyön jälkeen HÄLLSTRÖMin (1847) revontulitilastosta (1748-1828). Tilastoinnissa tarvittavat revontulien esiintymispäivät on julkaissut JOHANSSON (1911). Esiintymistodennäköisyys pienenee, kunnes auringon rotaatioajan (27 vrk) tuntumassa revontuliaktiivisuus jälleen kasvaa auringon aktiivisen alueen ollessa geoefektiivisessä paikassa.

Samassa Tiedeseuran julkaisussa, jossa Hällströmin revontulitilastot on esitetty, on myös toinen revontulien esiintymisien vuodenaikaisjaksollisuutta käsittelevä julkaisu (EKLÖF, 1847)[16]. Siinä tarkastelun kohteina olivat 12 revontulien aikasarjaa (kuukausiarvot) Keski-Euroopasta 1700-luvulta. Eklöf sai revontulien esiintymisien ääriarvoille suunnilleen samanlaisia päivämääriä kuin Hällström omassa tutkimuksessaan, mutta sekaannusta päivissä tuli siitä, että osassa aineistoja käytettiin vanhaa juliaanista kalenteria ja osassa nykyistä gregoriaanista ajanlaskua (Suomessa ja

[16] Johan Henrik Eklöf (1819–1854) toimi Helsingin yliopiston tähtitieteellisessä observatoriossa amanuenssina (1843–1847) ja myöhemmin Turun reaalikoulun matematiikan opettajana.

Ruotsissa vuodesta 1753 lähtien). Kalentereissa oli 10 päivän ero, jota Eklöf ei ollut ottanut huomioon kuten Hällström huomauttaa Turun ja Helsingin revontulihavaintoja käsittelevässä julkaisussaan.

3.2 *Suomen Tiedeseuran havainnot 1846–1855*

Suomen Tiedeseura perustettiin samana vuonna kuin Ilmatieteen laitoksen edeltäjä Helsingin yliopiston Magneettinen observatorio (1838) (SCHYBERGSON, 1998). J.J. Nervander oli Tiedeseuran perustajajäseniä ja Magneettisen observatorion esimies kuolemaansa (1848) saakka. Tiedeseuran toimesta käynnistettiin monia tärkeitä luonnontieteellisiä havainto-ohjelmia 1800-luvun aikana. Ensimmäisiä näistä oli Tiedeseuran vuonna 1846 käynnistämä koko Suomen kattava fenologinen havainto-ohjelma. Havainnot koskivat paitsi meteorologisia ja klimatologisia kohteita niin myös mukana oli suuri joukko muita geofysikaalisia kohteita sekä kasvi- ja eläinmaailmaan muutoksiin liittyviä merkintöjä (SIMOJOKI, 1978). Havainto-ohjelman ja havainnontekijöille tarkoitetut ohjeet suunnittelivat J.J. Nervander ja eläin- ja kasvitieteen professori J.M. Tengström[17]. Havainnontekijöinä oli lähinnä paikallisia virkamiehiä tai papiston edustajia. Suurin osa havainnoista oli visuaalisia huomioita luonnonilmiöistä, mutta viidellä asemalla tehtiin myös mittarihavaintoja meteorologisista suureista. Yleensä havainnot tehtiin kolmasti vuorokaudessa kello 7, 14 ja 21. Havaintopaikkoja oli enimmillään noin 200, joista eteläisin oli Ahvenamaan Kökarissa ja pohjoisin Lapissa Utsjoella. Tiedeseuran havainto-ohjelma oli käynnissä 10 vuotta 1846–1855. Havainnot kokosi ja julkaisi Adolf Moberg[18] (MOBERG, 1860).

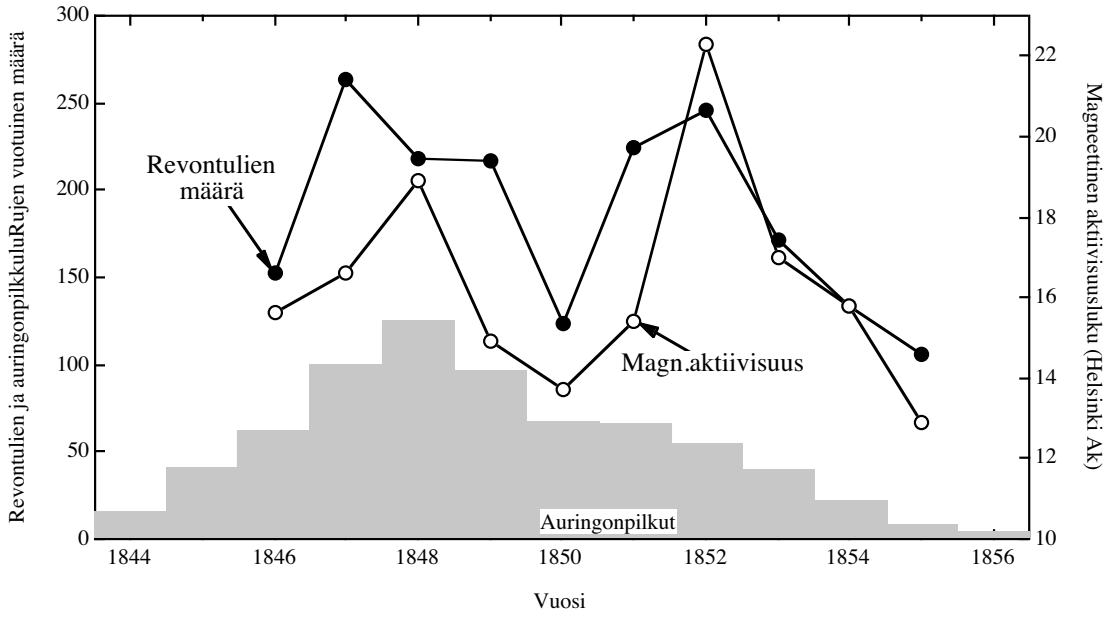
Kuvassa 3.6 on yhteenveto Tiedeseuran organisoiman havainto-ohjelman tuloksista revontulihavaintojen osalta. Siinä on revontulihavaintojen yhteenlaskettu määrä kaikilta asemilta 1846–1855. Havaintoasemat jaettiin neljään eri leveysastevyöhykkeeseen ja kultakin alueelta otettiin tilastoon vain yksi havainto revontuliyöksi. Näin saadaan vähennettyä moninkertaiset havainnot samasta revontulitapahtumasta.

[17] Johan Magnus Tengström (1793–1856) oli luonnonhistorian professori Turun Akatemiassa ja kasvi- ja eläintieteen professori Helsingin yliopistossa 1828–1849. Hän toimi myös Yliopiston kasvitieteellisen puutarhan esimiehenä.

[18] Adolf Moberg (1813–1895) oli kemian ja sittemmin fysiikan professori (1849–1875) Helsingin yliopistossa. Hänen vaikutuksestaan Suomen tiedeyhteisössä hyväksyttiin ensimmäisen kerran nykyisen kaltainen jääkausiteoria (KOIVISTO, 2004).

Parhaimmillaan havainnontekijä voi nähdä alhaalla horisontissa olevan revontulikaaren jopa noin 400 km etäisyydeltä. Näin eri vyöhykkeellä sijaitsevat havaitsijat kirjaavat tällaisessa tapauksessa saman revontulitapahtuman revontuliyöksi, mikä nostaa hieman vuotuista revontuliöiden summamäärää.

Kuvaan 3.6 on lisätty Helsingin magneettisen observatorion magneettisista mittauksista johdettu avaruussäätilan häiriöindeksi (ns. *Ak*-luku; NEVANLINNA, 2004a; 2009a), joka antaa revontulihavainnoista riippumattoman indikaation avaruussäähäiriöisyyden tilasta. Vaikka Tiedeseuran havainnontekijöiden määrä on vaihdellut vuodesta toiseen, niin vuotuinen revontuliöiden määrä seuraa varsin hyvin magneettisen häiriöisyyden vuosiarvoa kuten Kuvasta 3.6. voidaan nähdä. Eniten revontulia on ollut vuonna 1847, joka oli juuri ennen auringonpilkkujen maksimivuotta 1848. Vuoteen 1850 mennessä revontulien ja magneettisten häiriöiden määrä laski noustaakseen uudelleen vuonna 1852 neljä vuotta pilkkumaksimin jälkeen. Siitä eteenpäin kohti seuraavaa auringonpilkkuminimiä avaruussäähäiriöiden vuosimäärä laski tasaisesti. Näin revontuliaktiivisuus ja magneettiset avaruussäähäiriöt noudattivat kaksihuippuista jakaumaa auringonpilkkujakson aikana kuten tunnetaan lähes kaikkien myöhempien auringonpilkkujaksojen osalta.



Kuva 3.6. Pallot: Revontuliöiden lukumäärä 1846–1855 Suomen Tiedeseuran havainto-ohjelmassa (MOBERG, 1860; NEVANLINNA, 2004b).
Ympyrät: Magneettinen avaruussäähäiriöindeksi (*Ak*) Helsingin magneettisen observatorion havainnoista (NEVANLINNA, 2004b).
Harmaa alue: Vuotuiset auringonpilkkuluvut.

1700- ja 1800-luvuilla eräät yksityishenkilöt tekivät myös revontuli- ja säähavaintoja lähinnä omana harrastuksenaan. Tällaisia olivat Johan Julin[19] Oulussa, Anders Hellant[20] (kts. NEVANLINNA et al., 2003), Torniossa, Johan Portin[21] Yli-Torniossa. Monet heidän kokoamistaan revontulien ja muiden luonnonilmiöiden (säähavainnot, jäiden lähdöt yms.) havaintosarjoista kattavat usean vuosikymmen ajan, mutta havaintoja ei ole koskaan julkaistu painetussa muodossa. Alkuperäishavaintoja on kuitenkin myöhemmin käytetty ilmastollisten lämpötilasarjojen rekonstruktioissa (HOLOPAINEN, 2006).

Julkaistuun muotoon saatuja revotulihavaintoja ovat tehneet myös Jakob Fellman[22] Lappajärvellä vuosilta 1862–1873 (FELLMAN, 1874) ja Adalbert Krueger[23] vuosilta 1866–1871 Helsingissä (KRUEGER, 1872). Havainnoista on tiedot revontulien esiintymisen päivämääristä tai kuukausisummista.

3.3 *I Polaarivuoden havainnot Sodankylässä 1882–1883(1884)*

Tiedeseuran fenologisten ja meteorologisten havaintojen valtakunnallista laajuutta olleen havainto-ohjelman päätyttyä vuonna 1855 ei uusia laajamittaisia havaintokampanjoita käynnistetty vuosikymmeniin. Vasta Ensimmäisen polaarivuoden (1882–1883) ohjelma toi uutta aktiivisuutta Suomen geofysikaaliseen tutkimukseen ja havaintoihin osana alan kansainvälistä toimintaa. Helsingin yliopiston magneettis-meteorologinen observatorio koki samaan aikaan organisatorisen muutoksen yliopiston luopuessa observatorion isännyydestä. Vuonna 1881 observatorion toiminnot siirrettiin Suomen Tiedeseuralla (SEPPINEN, 1988). Hallitsijan päätös asiasta oli jo tosin tehty vuosia aikaisemmin. Samalla tapahtui nimenmuutos Meteorologiseksi Päälaitokseksi, joka kertoi myös toiminnallisen painopisteen siirtymisestä meteoro-

[19] Johan Julin (1752–1820) oli apteekkari ja luonnontutkija Oulussa.
[20] Anders Hellant (1717–1789) oli tähtitieteen ja geofysiikan tutkija. Hänet valittiin Ruotsin Kuninkaallisen Tiedeakatemian jäseneksi.
[21] Johan Portin (1760–1839) oli Yli-Tornion seurakunnan urkuri ja luonnontutkimuksen harrastaja.
[22] Jakob Fellman (1795–1875) oli Lappajärven seurakunnan kirkkoherra.
[23] Adalbert Krueger (1832–1896) oli saksalainen tähtitieteilijä, joka toimi Helsingin yliopiston tähtitieteen professorina 1862–1876.

logian suuntaan. Magneettisia mittauksia jatkettiin kuitenkin entisen tapaan. Laitoksen johto vaihtui myös, kun melkein 40 vuotta observatoriota johtanut H.G. Borenius (1802–1894) siirtyi eläkkeelle vuonna 1880 ja hänen seuraajakseen nimitettiin Nils Karl Nordenskiöld[24] (1837–1889) (SIMOJOKI, 1978; SEPPINEN, 1988). Näistä muutoksista alkoi uusi aktiivisempi kausi Keskuslaitoksella ja yleensä geofysiikan tutkimuksessa Suomessa.

Ensimmäisen kansainvälisen polaarivuoden edeltäjänä voidaan pitää 1830-luvulla toiminutta monivuotista kansainvälistä hanketta, joka tunnettiin nimellä "*Der Magnetische Verein*" (Magneettinen yhdistys) (MALIN and BARRACLOUGH, 1991). Se oli maineikkaan matemaatikon Carl Friedrich Gaussin (1777–1855) johtama kansainvälinen geomagneettinen mittaus- ja havainto-ohjelma. Ohjelmassa samanlaisilla magnetometreillä havannoitiin samanaikaisesti magneettikentän muutoksia yli 20:lla asemalla Keski-Euroopasta aina Pohjois-Norjaan asti (CHAPMAN and BARTELS, 1940). Havaintotiheys oli yleensä kerran tunnissa, mutta erikoispäivinä 12 kertaa tunnissa. Eräs tulos kampanjoista oli se, että pohjoisilla leveysasteilla magneettikentän muutokset ovat epäsäännöllisempiä ja voimakkaimpia kuin eteläisillä alueilla. Napa-alueiden tutkimus toteutuikin sitten Polaarivuoden ohjelmassa laaja-alaisemmin kuin vain magneettisten mittausten kautta.

Polaarivuoden havaintoperiodi kattoi 13 kuukauden aikavälin 1.8.1882–1.9.1883. Sinä aikana toiminnassa oli pohjoisella napa-alueella 12 asemaa, joista yksi oli Sodankylässä. Polaariasema sijaitsi suunnilleen 4 km luoteeseen nykyisestä Sodankylän geofysiikan observatoriosta. Sodankylän lisäksi Kultalassa Ivalossa toimi apuasema noin 100 km pohjoiseen Polaarivuoden pääobservatoriosta. Sodankylässä havainnot alkoivat 21.8., mutta havaintojen yhteenvedon sisältävään datajulkaisuun (vuosikirjaan) aineistot koottiin ajalta 1.9.1882–1.9.1883. Revontulien osalta havaintoja jatkettiin vielä vuodella 31.8.1884 saakka. Havainto-ohjelmassa olivat synoptiset säähavainnot (lämpötila, ilmanpaine, kosteus, tuuliolot yms.) lisättyinä revontulihavainnoilla. Magneettikentän vaihteluissa seurattiin kolmen komponentin vaihte-

[24] N.K. Nordenskiöldin vanhempi veli (Nils) Adolf Erik (1832–1902) oli kuuluisa tutkimusmatkailija ja Koillisväylän purjehtija (kts. Luku 3.4). A.E. Nordenskiöld joutui maanpakoon poliittisista syistä ja vaikutti vuodesta 1858 lähtien pysyvästi Ruotsissa.

luja. Lisäksi kohteena olivat maavirrat ja ilmasähköhavainnot. Yleensä kaikki havainnot tehtiin kerran tunnissa ja havaintojen kokonaismäärä oli tavallisina päivinä noin 750. Havainnoissa noudatettiin Göttingenin aikaa, joka oli 1 h 7 min jäljessä Sodankylän paikallisesta ajasta.

Havainnot julkaistiin neljänä laajana niteenä vuosina 1886–1898 (LEMSTRÖM et BIESE, 1886–1898). Kyseessä on valtava aineisto, joka käsittää kymmeniätuhansia havaintoja ja jotka julkaisuissa on esitetty taulukkoina ja ilmiöiden muutoksia havainnollistavien kuvioiden muodossa. Varsinaisia taulukkotietoja on tukemassa laajat taustaselosteet ja metadata-aineistot. Polaarivuoden magneettiset havainnot ja niistä johdetut magneettikentän häiriöi-syyden tunnusluvut on julkaistu myöhemmin uudelleen samalla formaatilla kuin mitä nykyisin tehdään magneettisten observatorioaineistojen suhteen (NEVANLINNA, 1998b, 1999).

Polaarivuoden Sodankylän retkikunnan johtajana toimi Selim Lemström ja observatorion toiminnoista vastasi Ernst Biese[25]. Polaarivuoden observatorion perustamisen vaiheet ja havaintojen kuvaukset on esitetty monessa eri julkaisuissa, joten tässä yhteydessä niitä ei ole tarpeellista kuvata tarkemmin. Lemström laati heti Polaarivuoden päätyttyä laajoja kertomuksia observatorion toiminnoista sekä selonteon varainkäytöstä hankkeen rahoittaneille Suomen Tiedeseuralle ja Senaatille. (LEMSTRÖM, 1883). Polaarivuoden mittauksista ja muusta toiminnasta ovat kirjoittaneet enemmän SIMOJOKI (1978), HOLMBERG (1992) ja KAILA (1998).

Polaarivuoden aikana tehdyt revontulihavainnot on julkaistu omana lukunaan datajulkaisun osassa 2 (LEMSTRÖM et BIESE, 1886-1898). Havaintoja on kaikkiaan useita satoja. Niissä on paljon yksityiskohtia revontulien muodoista ja niiden muutoksista, esiintymisajoista sekä sijainnista taivaalla sekä väreistä. Revontulimuodot Lemström oli jakanut kuuteen (I -VI) eri luokkaan:

I - II. Revontulikaaret

Ir. Tasarakenteinen kaari

[25] Ernst Biese (1856–1926) oli myöhemmin Meteorologisen päälaitoksen (nyk. Ilmatieteen laitos) johtaja 1890–1907.

Is. Säikeinen kaari

IIs. Säikeinen ja mutkitteleva kaari

IIr. Useampikertainen kaari

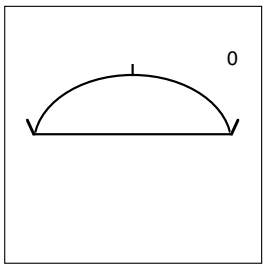
III. Verhomaiset säikeiset revontulimuodot

IV. Revontulikorona

V. Erilliset läiskämäiset revontulimuodot

VI. Yhtenäiset revontuliseinämät

Vakaana pysyttelevä revontulikaari pohjoisella taivaalla merkittiin havaintokirjaan omalla symbolillaan, jonka viereen liitettiin luku (0) joka kuvasti kaaren heikkoa valovoimakkuutta. Vain aktiivisiksi luokitellut revontulimuodot nimettiin roomalaisilla numeroilla (I–VI).



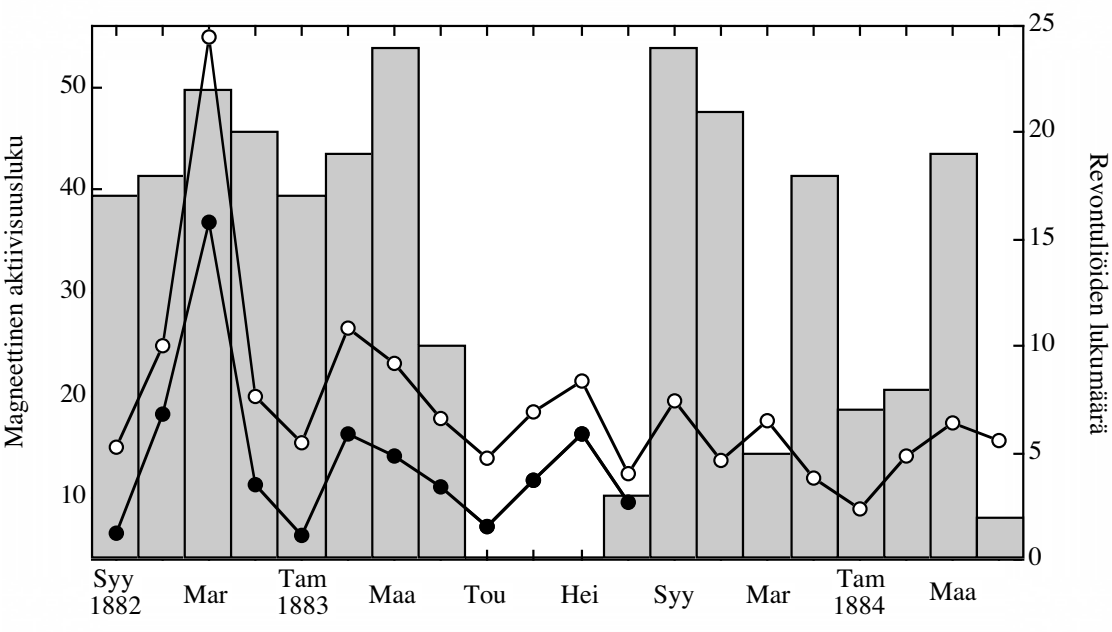
Kuva 3.7. Horisontissa näkyvän revontulikaaren symboli säähavaintojen taulukoinnissa.

Polaarivuoden havaintoperiodi sattui hieman ennen auringonpilkkujakson 12 maksimia (joulukuu 1883). Pilkkujakso alkoi lokakuussa 1878 ja uusi minimi oli kesäkuussa 1889. Pilkkumäärillä (liukuva kuukausikeskiarvo) mitattuna jakson 12 maksimi jäi keskimääräistä (113) lukemaa selvästi alemmaksi (75). Kuitenkin jakson aikana polaarivuonna 1882 sattui avaruussäätilastojen (1844–2009) kaksi erittäin voimakasta magneettista myrskyä: 20.11.1882 ja 17.11.1882. Ne saavuttivat *aa*-indeksillä mitattuna arvot 305 ja 263 (*aa*-indeksin määrittelystä kts. tarkemmin NEVANLINNA, 2009a). Myrskyjen voimakkuuslistalla arvot merkitsevät sijalukuja 10 ja 17. Aikaisemmin vuonna 1882 ennen Polaarivuoden ohjelman alkua sattui vielä kolmas suuri myrsky 17.4.1882 (*aa* = 292, sijaluku 15). Vaikka siis auringonpilkkujakson auringonpilkkuluvuilla mitattu huippuarvo jäi selvästi keskimääräistä alemmaksi jakson aikana oli kuitenkin useita poikkeuksellisen voimakkaita avaruussäämyrskyjä. Marraskuun 1882 *aa*-indeksin kuukausikeskiarvo oli 165 vuoden tilastoissa neljänneksi korkein (56). Selvästi häiriöisin (67) kuukausi oli marraskuu

2003, jolloin sattui tunnettu Halloween-myrsky (NEVANLINNA, 2006, BONE, 2007).

Sodankylän revontulihavainnoista käy ilmi, että 17.11. taivas oli pilvessä, mutta 20.11. myrskyn aikana näkyi poikkeuksellisen voimakkaita revontulia. Havaintoihin on kirjattu revontulien värien osalta violetti ja keltainen. Myrsky alkoi aamuyöllä noin klo 5 UT, jolloin magneettisista havainnoista johdetut 3 tunnin *K*-arvot nousivat lukemaan 9. Revontulimuodot muuttuivat nopeasti pohjoisen ja eteläisen horisontin välillä. Vastaavanlaisia revontulihavaintoja on tehty myös 13.11., vaikka magneettiselta häiriöisyydeltään yö ei ollut erityisen poikkeuksellinen.

Kuvassa 3.8. on yhteenveto Sodankylän polaariaseman revontulihavainnoista kuukausitasolla. Mukana kuvassa ovat magneettiset aktiivisuusindeksit (*aa* ja *Ak*). Revontulien määrässä ei ole suurta vaihtelevuutta kuukaudesta toiseen kuten on odotettavissakin napapiirin sisäpuolella sijaitsevan havaintoaseman tuloksista, jolloin revontulien rauhallisemmat muodot ovat näkyvissä lähes jokaisena selkeänä yönä. Keskimäärin joka toinen pilvetön yö on ollut revontulilla valaistu. Magneettisesti erittäin häiriöinen kuukausi (11/1882) ei tuottanut kuitenkaan poikkeuksellisen paljon revontulihavaintoja.



Kuva 3.8. Histogrammipilarit: kuukausittainen revontuliöiden lukumäärä Sodankylän Polaariasemalla 1882–1884.
Ympyrät: Globaalinen magneettinen aktiivisuusindeksi (*aa*).
Pallot: Sodankylän magneettisista havainnoista johdettu magneettinen aktiivisuusluku *Ak* (NEVANLINNA, 1998b).

3.3.1 *Lemströmin virtamittaukset revontulien yhteydessä*

Lemströmin kehittämän johdannossa mainitun revontuliteorian mukaan ilmakehässä on kahdentyyppistä sähkövarauskertymää, joista toinen purkautuu nopeasti salamoina, toinen hitaasti revontulina. Ilmiöinä sekä revontulet että salamat olivat Lemströmin mukaan siten samaa sähköistä alkuperää. Salamat olivat ilmakehän tiheiden kerrostumien ilmiö, revontulet taas napaseudun ohuen yläilmakehän tapahtuma. Ilmakehään syntyy Lemströmin mukaan varauksia veden höyrystymisen kautta. Ilmavirrat kuljettavat sähköllä varatun vesihöyryn napa-alueille, missä ilma puristuu kokoon, koska leveyspiirien säde on siellä pienempi. Suotuisissa olosuhteissa positiivinen varaus pääsi yhtymään maan negatiiviseen lataukseen, jolloin syntyi valoilmiö, revontulet. Sähkövirran välittäjähiukkasia, elektroneja ja ioneja, ei tuolloin vielä tunnettu lainkaan, joten sähköpurkauksien syvällisempi fysikaalinen perusta oli melko tuntematon. Lemströmin teoria revontulista, joka joissain oppikirjoissa tunnettiin nimellä Edlund-Lemströmin -teoria, sai hyvän vastaanoton revontulitutkijoiden keskuudessa, ja se vakiintui hyväksytyksi selitysmalliksi aina 1800-luvun loppuun saakka (GÜNTHER, 1885; ANGOT[26], 1897).

Lemström teki polaarivuoden aikana kokeita keinotekoisten revontulien aikaansaamiseksi kehittämällään sähköinduktorilla. Vastaavanlaisia kokeita tunnetaan muiltakin 1800-luvun tutkijoilta, mutta ilman vakuuttavia tuloksia näkyvästä revontulivalosta (mm. ANGOT, 1897). Laite, jolla revontulia piti saada aikaan oli Lemströmin terminologiassa "virtailukone". Niitä pystytettiin lähelle Sodankylän asemaa Oratunturille (noin 20 km itään), Kommattivaaralle (noin 6 km itään) ja Ivalon Kultalassa Pietarintunturille (nyk. Pietarlauttanen). Tunturin huipulta johdettiin kuparilanka alas tasamaalle, johon se maadoitettiin ja kytkettiin galvanometriin. Lemströmin ajatusmallin mukaan ilmasta maahan kulkeva virta helpottuisi kuparilangan avulla ja näin revontulivaloa synnyttävä reaktio käynnistyisi tunturin laella. Valoa pyrittiin valokuvamaan ja havainnoimaan spektroskoopilla, mutta tulokset olivat heikkoja eikä niitä myöhemminkään pystytty muiden tutkimusryhmien toimesta toistamaan (KAILA, 1998).

[26] Alfred Angot (1848–1924) oli ranskalainen revontulitutkija ja Pariisin meteorologisen laitoksen johtaja.



Kuva 3.9. Sodankylän polaarivuoden observatoriorakennuksia nykyisen kirkon ja pappilan välissä lähellä Kitisen jokea. Takana oikealla olevassa rakennuksessa olivat meteorologiset havaintolaitteet. Katolla on tuulimittari. Etualalla oikealla on magneettisten mittausten ns. absoluuttihuone. Kaksi muuta rakennusta vasemmalla olivat magneettisten kojeiden sijoituspaikkoina. Niistä oikeanpuolisin oli ns. "Lamontin[27] huone" ja sen vieressä vasemmalla "Wildin[28] huone".



Kuva 3.10. I Polaarivuoden sivuasema Ivalon Kultalassa noin 100 km Sodankylästä pohjoiseen. Etualalla oleva rakennus on ns. Kruununasema, joka toimi havainto- ja asuinrakennuksena. Pihapiirin aitat olivat tilapäisiä havaintokojuina. (Kuvat 3.9 ja 3.10: Finska Polarexpedition 1882–1884. Bidrag Finlands Natur o. Folk, 42, 1885, 1–172.).

Myöhemmin Polaarivuoden jälkeen Lemström yritti vielä saadaa keinotekoisia revontulia aikaan. Eräs koejärjestely tehtiin Helsingin Tuomiokirkon kupolin ristiin kiinnitetyllä virtajohtimella. Tämäkään koe, vaikkakin näyttävällä paikalla, ei tuottanut toivottavia tuloksia revontulien suhteen (SEPPINEN, 2006). Pienemmässä

[27] Johann von Lamont (1805–1879) toimi Saksassa Münchenin observatorion johtajana. Lamont suunnitteli erilaisia magneettisia kojeita, jotka olivat laajassa käytössä 1800-luvun magneettisissa observatorioissa.

[28] Heinrich Wild (1833–1902) oli sveitsiläinen meteorologi ja laitesuunnittelija. Hän toimi Venäjällä Keskusobservatorion johtajana (1868) ja oli aikansa huomatuimpia geofysiikan tutkijoita.

mittakaavassa Lemström konstruoi ohennetulla jalokaasulla täytetyistä putkista (Geisslerin[29] putket) maapallon sähköjärjestelmää jäljittelevän mallin. Putkiin johdettu virta tuotti valoilmiöitä nykyisten loistevaloputkien tapaan. Kyseessä olikin tavallaan keinotekoisista revontulista, koska lähes tyhjiöisessä loistevaloputkessa tapahtuva valon syntyprosessi muistuttaa avaruuden oloissa tapahtuvaa revontulivalon tuottoa atomitasolla absorptio- ja emissiotapahtumana.

Polaarivuoden havainto-ohjelmaan kuului myös revontulien esiintymiskorkeuksien määrittäminen. Kysymys oli askarruttanut tutkijoita jo revontulitutkimuksen alkuajoista lähtien 1600-luvulta. Yleensä revontulet sijoitettiin korkealle ilmakehään, mutta täyttä varmuutta asiasta ei saatu.

Korkeusmääritys perustui yksinkertaiseen kolmiomittausperiaatteeseen. Siinä kahdelta suunnilleen pohjois-eteläsuunnassa olevalta asemalta pyritään mittaamaan saman revontulimuodon korkeuskulma (α ja β) horisontista. Kun havaintoasemien välimatka (d) tunnetaan, voidaan revontulimuodon esiintymiskorkeus (h) maanpinnalta laskea yksinkertaisella kaavalla:

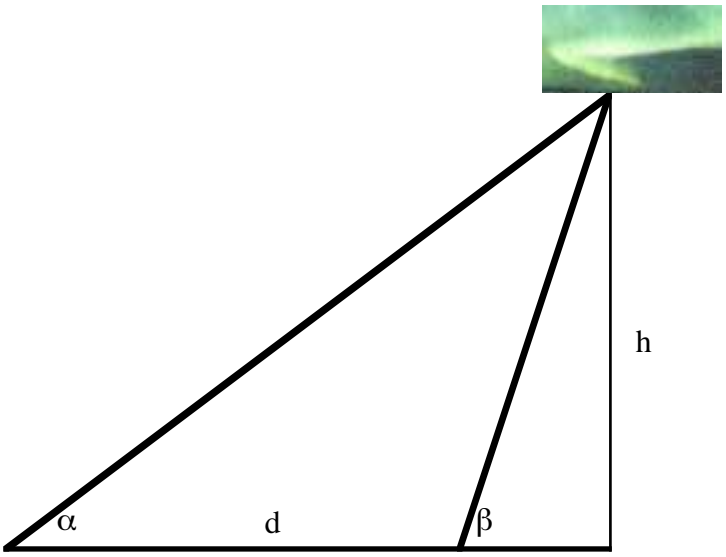
$$h = d\frac{\sin\alpha\sin\beta}{\sin(\beta-\alpha)} \tag{3.4}$$

mikäli havaitsijoiden välinen etäisyys (d) on niin pieni (esim. 100 – 200 km), ettei maapallon kaarevuutta tarvitse ottaa huomioon. Yleensä kulmat α ja β ovat lähes yhtäsuuria, joten laskettu korkeus (h) suuresti riippuu havaintojen tarkkuudesta. Lisäongelmana on havaintojen saaminen samanaikaiseksi ja se, että todella tähdätään samaan revontulimuotoon.

Mittaukset ennen Polaarivuotta antoivat laajan alueen korkeusmäärityksille suunnilleen 50 km ja 1500 km välille (KAILA, 1998). Tuloksissa ei aina tehty eroa mitattiinkin korkeutta revontulimuotojen tai -kaaren ala- vai yläreunasta. Nämä tarkkuusongelmat olivat tiedossa Sodankylässä ja Kultalassa tehdyissa korkeusmittauksissa. Havaintojen samanaikaisuutta ja samaa kohdetta tapahtuvaa tähtäystä auttoi

[29] Johann Geissler (1814–1879) oli saksalainen fyysikko, joka tuli tunnetuksi erilaisten valoilmiöiden keksimisestä, kun sähkövirta ohjattiin ohennetulla kaasulla täytettyihin lasiputkiin.

asemien väillä oleva puhelinyhteys, joka saatiin kahden havaintopisteen välille noin 5 km etäisyydelle (LEMSTRÖM, 1886). Tulokset olivat ristiriitaisia ja niiden tulkinta oli, ettei kaikesta yrityksestä huolimatta havainnontekijät olleet saaneet tähtäykseen samaa revontulimuotoa. Toisaalta Norjan polaarivuoden retkikunta sai korkeusmittauksiensa tuloksista varsin uskottavia arvoja 76–163 km (BREKKE and EGELAND, 1994).



Kuva 3.11. Revontulimuodon korkeuden (h) määrittäminen kolmiomittausmenetelmällä. Havaitsijat, joiden keskinäinen välimatka on d, näkevät saman revontulimuodon kulmaissa α ja β. Korkeus voidaan näistä tiedoista lähtien laskea yhtälöstä (3.4), jos maapallon kaarevuus jätetään huomioimatta.

3.3.2 *Polaarivuoden tuloksia*

Lemströmin johdolla toteutettu Polaarivuoden havainto-ohjelma oli monipuolinen ja kattava sekä huolella suunniteltu ja toteutettu vaikeissa olosuhteissa. Tulokset julkaistiin suhteellisen pian polaarivuoden jälkeen kansainväliseen jakeluun. Kaikki havainnot olivat parasta mitä ilman minkäänlaista automatiikkaa pystyttiin tuottamaan. Mitään suurta tieteellistä läpimurtoa ei tuloksista voi johtaa. Ehkä merkittävimmäksi saavutukseksi jäi se, että suomalainen tiedeyhteisö pystyi menestyksellisesti osallistumaan vaativaan kansainväliseen hankkeeseen. Polaarivuoden ohjelma oli Suomen itsenäinen kontribuutio tiedeyhteisössä eikä osa Venäjän osuutta, vaikka Suomi valtiollisesti kuului Venäjän yhteyteen.

Lemströmin revontulihavainnot ja -mittaukset jäivät tuloksiltaan varsin laihoiksi, vaikka itse mittaukset oli huolella läpiviety ja niitä tehtiin runsaasti. Lemströmin paradigmat revontulien sähköisestä luonteesta ja niiden esiintymisestä aivan maanpinnan läheisyydessä osana telluurista virtajärjestelmää oli virheellinen. Lemströmin ja hänen aikalaistensa käsitykset revontulien synnystä ilmasähköisenä ilmiönä on nähtävä yrityksenä selittää saman teorian avulla ilmakehän sähköilmiöt, revontulet ja salamat sekä maan magneettisuus ja sen vaihtelut. 1800-luvun keskivaiheen geofysikaalisen tietämyksen perusteella pyrkimys yhtenäisteoriaan näiden ilmiöiden selittämisessä oli aivan luonnollinen ja lähtökohdiltaan perusteltu, kun otetaan huomioon kuinka vajavaisesti vielä tunnettiin revontuli-ilmiöön liittyvät sähkömagneettiset ja atomaariset tekijät.

Lemströmin paradigma ilmasähkön keskeisestä roolista sekä revontulien että magneettisten häiriöiden synnyssä johti käytännössä siihen, että geomagneettisten observatorioiden havainto-ohjelmiin kuuluivat kiinteänä kokonaisuutena magneettisten mittausten ohella myös revontuli- ja ilmasähkö- ja maavirtamittaukset kuten oli esim. Sodankylän Polaarivuoden observatoriossa. Monissa observatorioissa (kuten Sodankylässä) sama mittaustraditio jatkui vielä pitkälle seuraavan vuosisadan puolelle, vaikka ilmasähkön ja maavirtojen osuus fysikaalisena tekijänä revontulien selitysmalleissa oli jo jäänyt taka-alalle. Näille geofysikaalisille tutkimuskohteille kehittyi muita sovelluksia; edellisestä meteorologiaan, jälkimmäisestä mm. maaperän sähköisen rakenteen tutkimukseen.

Vuonna 1897 keksittiin elektroni, josta Kristian Birkeland[30] sai uuden välittäjäagentin auringon ja revontulien välille; de Mairanin yli 150 vuotta aikaisemmin esitettämä teoria sai uutta sisältöä. Aivan vuosisadan alussa ilmestyneessä kosmisen fysiikan oppikirjassa (ARRHENIUS[31], 1903) uudet teoriat ovat näyttävästi esillä, ja Edlund-Lemström - hypoteesi oli jäämässä unohduksiin. Birkelandin vuosisadan alussa tekemät kokeet katodisäteillä ja maapallon fluorisoidulla magneettisella pienoismallilla (terrella) osoittivat yhä vakuuttavammin, että auringon sähköisesti varatut

[30] Kristian Birkeland (1867–1917) oli norjalainen revontulitutkija, joka esitti revontulien johtuvan auringon sinkoamista partikkeleista kuten elektroneista.
[31] Svante August Arrhenius (1859–1927). Hän sai Nobelin kemianpalkinto 1903. Arrhenius esitti ensimmäisenä laskelman ilmakehän hiilidioksidin ja vesihöyryn kasvihuonevaikutuksista.

hiukkaset maan magneettikentän ohjaamina parhaiten sopivat revontulien kosmiseksi aiheutta-jaksi. Birkelandin terrelan fluorisoitu pinta hehkui katodisädepommituksessa vain rengasmaisilla vyöhykkeillä pallon magneettisten napojen ympärillä kuin revontulet maapallolla. Störmerin teoreettiset laskelmat elektronien liikeradoista maan magneettisessa dipolikentässä vahvistivat Birkelandin mallikokeiden keskeiset tulokset. 1920-luvulla Birkeland-Störmer -hiukkasmallit revontulien aiheuttajana olivat lopullisesti syrjäyttäneet Lemströmin ilmasähköön perustuvan teorian. Esimerkiksi saksalaisessa geofysiikan yliopisto-oppikirjassa (NIPPOLDT[32] et al., 1929) Lemström on mukana enemmän ikäänkuin kuriositeettina revontulitutkimuksen sukupuuttoon päättyneestä evoluutiohaarakkeesta. Chapman-Ferraron 1930-luvun alussa kehittämä protomalli magnetosfäärin rakenteesta ja magneettisista myrskyistä avasi lopullisen kehityksen kohti nykyistä käsitystämme revontulista magnetosfääriprosessina osana aurinko-maa systeemin kokonaisuudessa (CHAPMAN and FERRARO, 1931).

3.4 *A.E. Nordenskiöldin revontulimittaukset Koillisväylän purjehduksella*

A.E. Nordenskiöldin Vega-alus joutui Koillisväyläpurjehduksellaan talvehtimaan lähellä päämääräänsä Beringin salmea. Talven 1878–79 aikana retkikunta teki runsaasti geofysikaalisia mittauksia ja havaintoja Siperian arktisissa olosuhteissa. Systemaattisten havaintojen kohteena olivat mm. revontulet ja maan magneettikentän vaihtelut. Talvehtimispaikka sijaitsi lähellä revontulivyöhykettä leveysasteella 67°N. Tutkimusmatka tehtiin auringonpilkkujen minimin aikaan, joten Nordenskiöld saattoi havaita rauhallisia revontulikaaria magneettisesti täysin häiriöttömissäkin tilanteissa. Hän havaitsi, että rauhalliset kaaret esiintyvät aina suunnilleen samaan suuntaan orientoituneina, nauhamaisina vyöhykkeinä. Nordenskiöld laski kaarien suunnasta, että kaaret ryhmittyvät napakalotissa nauhamaiseen muotoon symmetrisesti tietyn pisteen ympärille. Kyseinen piste oli Nordenskiöldin päätelmien mukaan useita satoja kilometrejä pohjoisempana kuin geomagneettinen napa (dip-pole) (napamääritelmistä kts. NEVANLINNA, 2009a). Nordenskiöldin havainnoista uudelleen laskettuna tämä piste osuu maan magneettikentän dipolinavan kohdalle, jos käytetään navan paikkaa vuoden 1880 geomagneettisessa globaalimallissa. Toisin sanoen Nordenskiöld oli päätellyt havainnoistaan revontulivyöhykkeen ja sen dipolinapaan liittyvän symmet-

[32] Alfred Nippoldt (1874–1936) oli fysiikan professori Berliinin yliopistossa. Niemegkin geomagneettisen observatorion perustaja (1930).

riakeskuksen vuosikymmeniä ennen revontuliovaalin vakiintumista revontulitutkimuksen käsitteistössä (kts. myös NYGRÉN and SILÉN, 1982). GÜNTHER (1885) kutsui napaa nimellä "*der Nordenskiöld'sche Punkt N*" (Kuva 3.11). Samanlaiseen tulokseen revontulirenkaasta oli aikaisemmin päätynyt mm. norjalainen H.C.Hansteen[33] vuonna 1859 ja, samoihin aikoihin Nordenskiöldin kanssa, Tromholt (BREKKE and EGELAND, 1994), mutta heidän hypoteesinsa jäivät tiedeyhteisössä unohduksiin.

Nordenskiöldin tulkinnan mukaan napaa *N* (Kuva 3.11) ympäröi kaksi samankeskistä ympyrän muotoista nauhamaista vyöhykettä. Pohjoisemmassa vyöhykkeessä esiintyy rauhallisia revontulien kaarimaisia perusmuotoja, eteläisemmässä taas palavat revontulien aktiiviset ja nopeasti muotoaan muuttavat loimut. Nordenskiöldin malli muistuttaa nykykäsitystä revontulivyöhykkeen laajentuessa revontulialimyrskyn aikana. Hänen näkemyksensä revontulivöiden paikoista vastaa tavallaan niiden keskiarvoa, jossa rauhallinen perustila (sisempi vyöhyke) ja laajentunut aktiivinen ovaali toistuu useita kertoja pitkän ajan kuluessa.

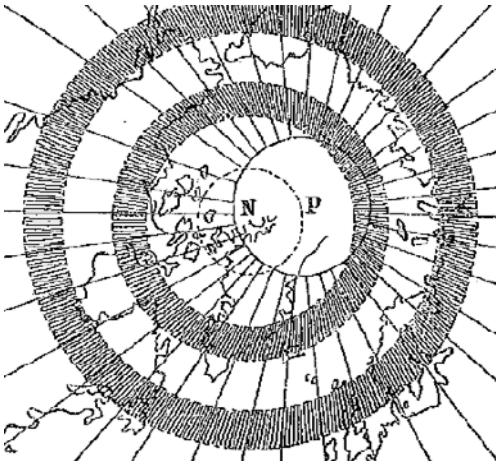
Nordenskiöld sai revontulikaaren keskikorkeudeksi 190 km yhdeltä paikalta tehdyistä mittauksista. Näitä mittauksia on käsitellyt myös Selim Lemström revontulikirjassaan (LEMSTRÖM, 1886), jossa Nordenskiöldin havaitsemien revontulien esiintymiskorkeudeksi annetaan lukemia 40 km korkeudestä ylöspäin. Käytetty laskentamenetelmä on kuitenkin hyvin herkkä mittausvirheille, ja tulokset riippuvat paljon tähtäyspisteen määrittelystä. Yleinen käsitys revontulien korkeudesta oli, että revontulien esiintymiskorkeus on matalimmillaan napaseuduilla ja korkeimmillaan eteläisemmillä leveysasteilla (ARRHENIUS, 1903). LEMSTRÖMin (1886) mukaan revontulia voidaan napaseuduilla havaita aivan maanpinnassa

3.5 *Revontulivyöhykkeet 1800-luvulla*

1800-luvun puolivälin jälkeen revontulien tutkijoilla oli käytössään runsaasti havaintoja revontulien esiintymisistä pohjoisilla leveysasteilla. Näiden tietojen perusteella pystyttiin laskemaan revontulien keskimääräiset esiintymistodennäköisyydet vuotta

[33] Hans Christian Hansteen (1784–1873) oli norjalainen fyysikko ja geomagneetikko, joka tutki erityisesti maapallon magneettikenttää. Hansteen teki laajoja tutkimusmatkoja mm. Siperiaan ja Suomeen. Hän perusti Oslon magneettisen observatorion vuonna 1841.

kohden. Ensimmäinen tällainen tutkimus ilmestyi vuonna 1860 (LOOMIS[34], 1860; AKASOFU et al., 1966). Siinä oli selvillä revontulien esiintymisjakauman yleiset säännönmukaisuudet: esiintymisfrekvenssin kasvu etelästä pohjoiseen, mutta vain tiettyyn leveysasteeseen saakka, jonka jälkeen revontulien esiintymistodennäköisyydet pienenevät. Tiedettiin myös, että soikion muotoisen revontulialueen geometrinen symmetriakeskus ei ole maantieteellinen napa vaan se eroaa siitä noin 10° (Kuva 3.12). Kolmiulotteisesti tarkasteltuna revontulisoikio ymmärrettiin rengasmaiseksi muodostelmaksi magneettisen navan yläpuolella kuten Kuva 3.13 osoittaa.



Kuva 3.12. A.E. Nordenskiöldin revontulivyöhykkeet (GÜNTHER, 1885). Koillisväyläpurjehduksen aikana (1878–79) tehdyista havainnoista Nordenskiöld päätteli, että revontulien rauhalliset kaarimaiset perusmuodot sijoittuvat sisemmän renkaan alueelle ja nopeasti muuttuvat ulommalle kehälle. Tämä näkemys vastaa nykyistä käsitystä revontuliovaalin laajenemisesta perusmuodostaan revontulialimyrskyn aikana. Molempien kehien keskipiste on kohdassa *N*, joka Nordenskiöldin havaintojen mukaan on maan magneettikentän dipolinapa. *P* on maantieteellinen pohjoisnapa.

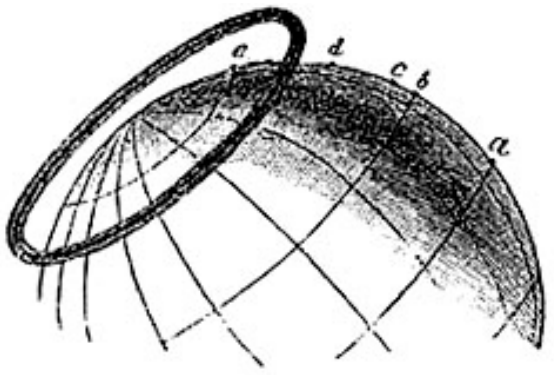
Revontulien leveysasteiden mukaan muuttuvista esiintymisfrekvensseistä FRITZ[35] (1881) käytti nimitystä "isochasmi", joka palautuu antiikin aikana revontulia tarkoittavaan termiin chasmata (Luku 1.1). Isochasmit ovat kartalla tasa-arvoviivoja, joissa revontulien esiintymisöiden määrä on sama (Kuva 3.14). Ne kaartuvat leveys- ja pituusasteiden mukaisesti siten, että viivat ovat likimain kohtisuorassa paikallista geomagneettista meridiaanisuuntaa vastaan. Myöhemmin 1900-luvulla VESTINE[36]

[34] Elias Loomis (1811–1889) oli Yalen yliopiston tähtitieteen professori USA:ssa.

[35] Hermann Fritz (1830–1893) oli konetekniikan professori Zürichin yliopistossa. Modernin revontulitutkimuksen perustajia.

[36] Ernest Harry Vestine (1906–1968) oli USA:n Carnegie-instituutin Geofysiikan osaston johtaja.

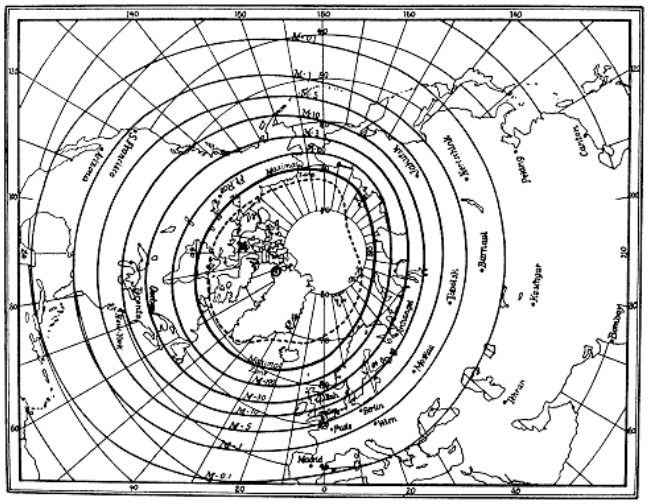
(1944) täydensi isochasmien jakaumatietoja uudemmalla revontuliaineistolla II Polaarivuoden ajalta. Tilastot ulotettiin myös eteläiselle pallonpuoliskolle (VESTINE and SNYDER, 1945). VESTINEn mukaan isochasmiviivojen symmetriakeskus on tarkkaan maan magneettikentän dipolinavan kohdalla, jossa myös revontulien esiintymisfrekvenssi on pienempi kuin etelämpänä. Navan ympärillä Grönlannin luoteisosassa ja Kanadan arktisen saariston koillisosassa revontulien esiintymisien keskimääräinen todennäköisyys on samaa suuruusluokkaa kuin Suomessa Oulun leveysasteella eli noin 20 % kaikista sellaisista öistä, jolloin revontulia voi nähdä (NEVANLINNA and PULKKINEN, 2001).



Kuva 3.13. 1800-luvun lopulla hahmottui käsitys siitä miten revontulet esiintyvät maapallon magneettisen navan kiertävällä rengasmaisella alueella. Kuvassa on revontulirengas Tromholtin vuonna 1885 ilmestyneessä julkaisussa (BREKKE and EGELAND, 1994).

1800-luvulla tiedot revontulien ajallisista ja paikallisista vaihteluista perustuivat yksinomaan näköhavaintoihin. Revontulien esiintymisalueiden tiedettiin ryhmittyvän maapallon magneettikentän mukaisesti dipolinapojen ympärille, vaikkakin havainnot olivata lähes yksinomaan pohjoiselta pallonpuoliskolta. Revontulien esiintymistodennäköisyyden kasvu magneettikentän häiriöiden ja myrskyjen yhteydessä oli tunnettu tosiasia. Samoin revontulien esiintymisien vaihtelut auringonpilkkujakson (11 v) kanssa oli tunnettu tosiasia, vaikkakaan mitään syytä tälle riippuvuussuhteelle ei osattu esittää. Itse revontulivalon spektrimittaukset olivat edistyneet ja vihreän revontuliviivan 557 nm (tai 1800-luvulla vallinneen käytännön mukaan 5570 Ångströmiä) ohella tunnettiin revontulivalon punaiset ja ultravioletit spektriviivat.

Tiedot revontuli-ilmiön nopeiden vaihtelujen systemaattisista ajallisista ja paikallisista piirteistä tuntien mittaisissa alimyrskytilanteissa olivat varsin puutteellisia. Vasta kameratekniikan kehittymisen myötä 1900-luvulla oli mahdollista saada kokonaisvaltainen käsitys revontulien esiintymisen dynamiikasta. Valokuvausmenetelmällä saatiin myös varmaa tietoa revontulien esiintymisien korkeusalueesta. Tämä kehityskulku huipentui IGY:n (International Geophysical Year) aikana 1957-1958. Tällöin polaarialueet kattavalla revontulikameroiden verkostolla saatiin yhtenäinen kuva revontuli-alimyrskyjen vaihteluista ajan ja paikan suhteen riittävällä resoluutiolla. Moderni suomalainen revontulitutkimus ja -havainnointi käynnistyi myös Geofysiikan vuoden aikana.



Kuva 3.14. Revontulien esiintymisfrekvenssin samanarvokäyrät eli isochasmit FRITZin (1881) mukaan. Tasa-arvoviivoihin liitetyt luvut (*M*) antavat revontuliöiden lukumäärän vuodessa. *M*:n maksimi on (= 100) osuus Skandinavian sektorissa Norjan pohjoisrannikolle, mutta sen pohjoispuolella revontulien esiintymistodennäköisyys laskee. Suomen alueella *M* on likimain 10...100.

3.6 *Revontulihavainnot synoptisten säähavaintojen yhteydessä 1881–1964*

Suomen Meteorologinen Päälaitos organisoitiin vuonna 1881 Helsingin yliopistosta Tiedeseuran alaisuuteen. Samalla laitoksessa käynnistyi kaikilla toiminnan tasoilla uudistuminen ja yleinen aktivoituminen lähestyvän Kansainvälisen Polaarivuoden myötä. Keskeisiä vaikuttajia olivat laitoksen johaja N. A. Nordenskiöld ja Yliopiston fysiikan professori S. Lemström. Samana vuonna aloitettiin säännölliset synoptiset säähavainnot eri puolilla Suomea osana kansainvälistä sääasemaverkostoa. Havaintoohjelmaan kuuluivat myös revontulihavainnot. Aluksi sääasemia oli 13, joista

eteläisin oli Hangon majakka (59.8 °N; 23.0 °E) ja pohjoisin Oulun majakka (Marjaniemi) (65.0 °N; 24.6 °E). Vähitellen vuosikymmenien edetessä asemien lukumäärä kasvoi ja verkosto kattoi koko Suomen alueen pohjoisinta Lappia myöten. Vuonna 1964, jolloin revontulihavainnot poistettiin havainto-ohjelmasta, toiminnassa oli noin 150 sää- ja ilmastoasemaa.

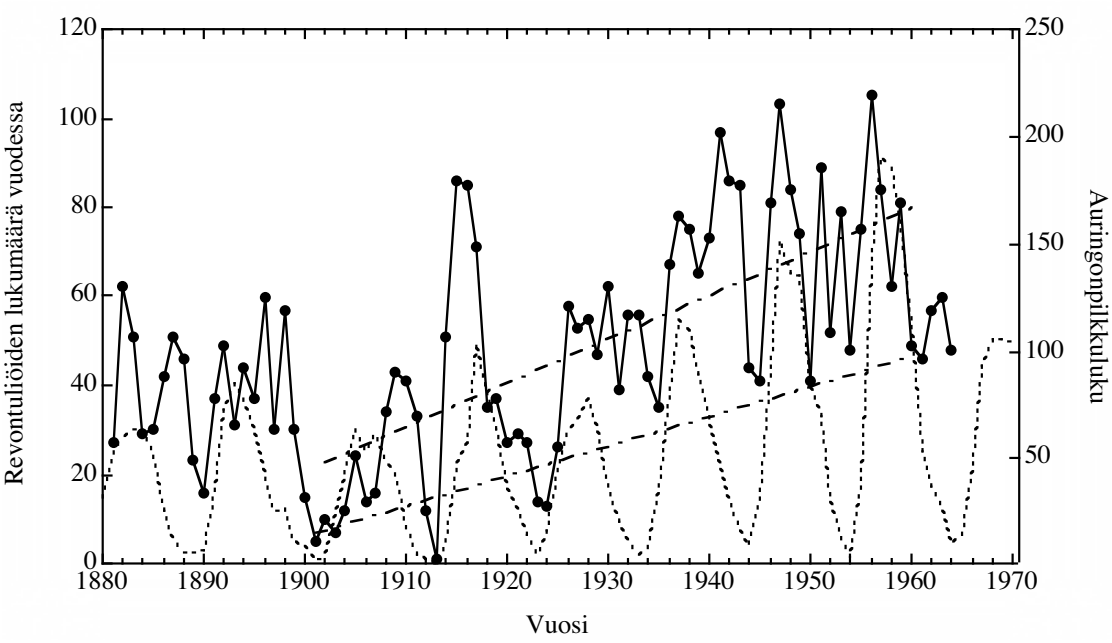
Sääasemaverkoston alkuaikoina havainnot tehtiin kolme kertaa päivässä kello 7, 14 ja 21 paikallista aikaa. Myöhemmin havaintoväli oli pääasiassa 6 tuntia kello 02:sta lähtien. Revontulien näkymisestä tehtiin merkintä säähavaintokirjaan omalla kansainvälisellä symbolillaan (Kuva 3.7). Ilmiön voimakkuuden mukaan siihen liitettiin numerot 0, 1 tai 2 ja tarkennukseksi usein kellonaika ilmiön kestosta tai vain ylimalkaisesti *p* (ilta) tai *n* (yö).

Hieman yli 60 vuoden (1881–1964) revontulihavainnoista on kertynyt noin 4000 merkintää revontuliesta eri puolilla Suomea. Kuvaan 3.15 on merkitty näin saadut vuotuiset revontuliyöt aikasarjana, Yhdeksi revontuliyöksi on määritelty jokainen sellainen yö, jolloin ainakin yksi sääasema on merkinnyt revontulia havaintovihkoon.

Revontulien määrässä on havaittavissa selkeä kasvutrendi 1900-luvun alusta 1960-luvulle yhdessä kasvavien auringonpilkkulukujen huippuarvojen kanssa pilkkujaksosta toiseen. Revontulien huippumäärät kasvoivat 1900-luvun alusta noin kolminkertaisiksi 1960-luvulle mentäessä. Kuva 3.16 vahvistaa tämän kasvavien revontulimäärien laajemmasta globaalisesta revontuliaineistosta, joten Suomessa havaittu revontuliöiden määrän kasvu ei ole vain alueellinen ilmiö tai havaintoaineiston epähomogeenisuuden tuote. Kyseessä on revontulitilasto, jonka ovat koonneet LEGRAND and SIMON (1987) ja joka kattaa aikavälin 1780–1979 eli 200 vuotta.

Aineistossa on mukana revontulet suunnilleen magneettiseen leveysasteeseen 58° saakka, mikä vastaa Suomen alueella satakunta kilometriä Helsingistä pohjoiseen.

Kuvan 3.16 mukaan nähdään, että sekä Suomen että globaaliaineiston mukaan revontuliöiden lukumäärä on vaihdellut ajallisesti samalla tavalla. Muutoksen on aiheuttanut auringon aktiivisuuden hidas kasvu. Erityisesti 1900-luvun puoliväliin saakka ja

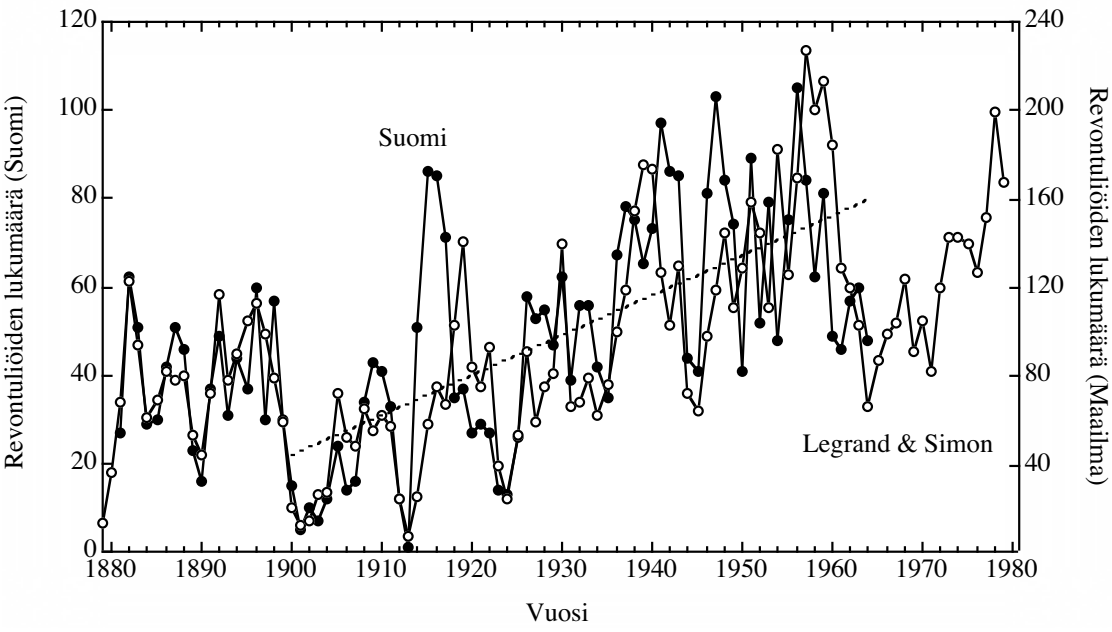


Kuva 3.15. Palloviiva: Revontuliöiden vuotuinen lukumäärä Suomessa säähavaintoasemilla tehtyjen revontulimerkintöjen mukaan.
Pisteviiva: Auringonpilkkuluku
Pistekatkoviiva: Auringonpilkkuluvun (alempi) ja revontulien vuotuisen määrän (alempi) kasvutrendi 1900–1964.

siitä hieman ylikin revontuliöiden huippumäärät ovat kasvaneet sekä Suomessa että maailmanaineistossa lineaarisesti. Revontuliöiden määrä kasvoi Suomessa noin 10:llä vuosikymmentä kohden 1900–1965.

Revontuliaktiivisuus ja maan magneettikentän häiriöisyys ja myrskyisyys ovat läheisesti kytkeytyneet toisiinsa osana magnetosfääriprosesseja aurinko-maa vuorovaikutusilmiöissä.

Magneettikentän häiriöiden voimakkuus ja revontuli-ilmiöiden intensiteetti riippuvat siitä kuinka paljon energiaa aurinkotuulesta siirtyy magnetosfäärin sisäpuolelle. Energian kasvu riippuu olennaisesti aurinkotuulen nopeuden (V) ja siinä mukana kulkevan interplanetaarisen magneettikentän voimakkuuden (B) neliön tulosta (VB^2). Näiden parametrien tiedetään voimistuneen merkittävästi 1900-luvun ensimmäisen puoliskon aikana auringonpilkkujaksosta toiseen; B noin 45 % ja V noin 14 % maapallon kohdalla (LOCKWOOD, 2003; ROUILLARD et al., 2007). Näin siis interplanetaarisen kentän systemaattinen vahvistuminen on ollut suurin tekijä revontulien määrien lisääntymiseen ja magneettikentän häiriöisyyden (*aa*-indeksillä mitattuna) kasvuun (Kuva 3.17).



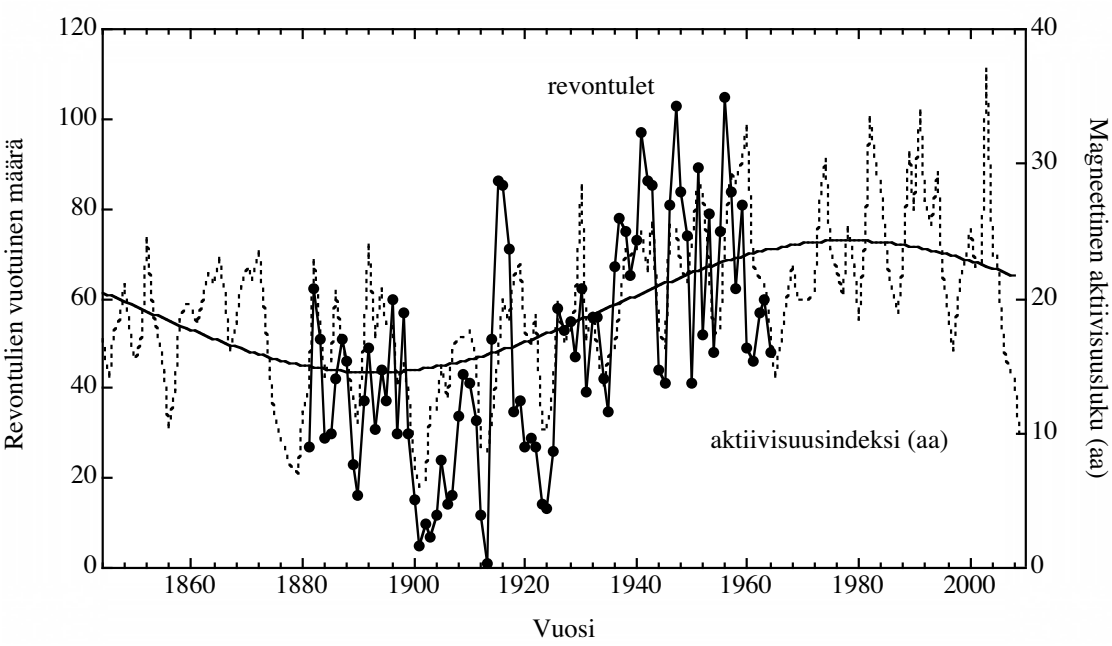
Kuva 3.16. Palloviiva: Revontuliöiden määrä Suomessa tehtyjen havaintojen mukaan.
Ympyräviiva: maapallonlaajuinen revontuliaineisto (LEGRAND and SIMON, 1987).
Pistekatkoviiva: Revontulien määrän lineaarinen kasvutrendi Suomessa 1900–1965.

1800-luvun jälkimmäisellä puoliskolla oli noin 50 vuoden periodi, jolloin ei tapahtunut juuri lainkaan systemaattista kasvua magneettikentän häiriöisyydessä (*aa*-indeksi; Kuva 3.17) ja revontuliaktiivisuudessa 1881–1900 kuten Kuvasta 3.16 ja 3.17 voidaan nähdä, vaan pikemminkin aktiivisuus oli hitaassa laskussa. Samanlainen aktiivisuuden pudotus tapahtui 1960-luvun jälkeen, jona aikana magneettinen aktiivisuus on hitaasti kääntynyt laskuun saavuttaen pienemmän arvonsa sitten 1920-luvun (NEVANLINNA, 2009b).

Kuten Kuvasta 3.17. voi havaita, revontuliöiden lukumäärä (n) Suomessa ja magneettikentän häiriöisyys (*aa*-indeksi) seuraavat tarkkaan toisiaan. Ajanjaksolla 1881–1964 näiden välillä vallitsee tilastollinen riippuvuus:

$$n = -10.5 + 3.2\,aa \tag{3.5}$$

missä lineaarinen korrelaatiokerroin (r) on +0.73. Yhtälön (3.5) mukaan voidaan *aa*-indeksin vuosiarvon avulla arvioida revontuliöiden lukumäärää sellaisille ajanjaksoille, joista ei ole synoptisia revontulihavaintoja. *aa*-indeksin suurin arvo ajalla 1844–2009 saavutettiin vuonna 2003, jolloin tilastollisen riippuvuuden mukaan



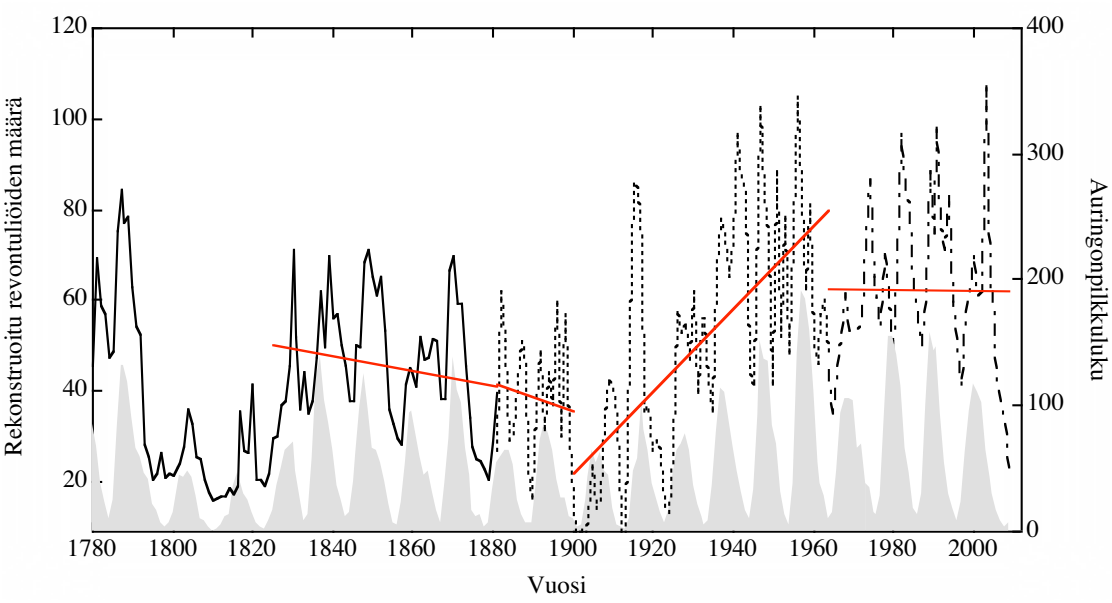
Kuva 3.17. Katkoviiva: magneettikentän häiriöisyysindeksi (*aa*) 1844–2009.
Yhtenäinen viiva: *aa*-indeksin tasoitettu vaihtelu siniaaltona (T = 171 v)
Palloviiva: revontuliöiden vuotuinen lukumäärä Suomessa.

revontuliöiden lukumäärä on ollut noin 110 eli hieman suurempi kuin 1950–1960 -lukujen aktiivisina vuosina. Toisaalta magneettikentän häiriöisyys (*aa* = 10) laski poikkeuksellisen alas auringonpilkkujen minimivuosina 2008–2009, jolloin revontuliöiden määrä putosi noin 20:een vastaten 1900-luvun alkuvuosien alhaista revontuliaktiivisuutta.

Kuvassa 3.18 on revontuliöiden lukumäärän rekonstruktio ajalle 1780–2009. Siinä aikasarjan alkuosa 1780–1881 perustuu Suomen revontulihavaintojen (F) (1881–1964) ja samanaikaisen maailmanaineiston (LEGRAND and SIMON, 1987) (G) tilastolliseen sovitukseen, jonka mukaan yhteys on:

$$F = 15.6 + 0.36G \tag{3.6}$$

missä r = +0.68. Yhtälön avulla voidaan ekstrapoloida maailmanaineistosta Suomen oloja vastaava revontuliöiden lukumäärä ajalle 1780–1881 (Kuva 3.18). Suomen revontuliöiden lukumäärän aikasarjan jatkaminen vuodesta 1964 vuoteen 2009 saakka perustuu yhtälön (3.5) mukaiseen riippuvuuteen *aa*-indeksin ja revontuliöiden lukumäärän välillä. Näin on saatu Suomen alueen revontuliöiden lukumäärän aikasarjan



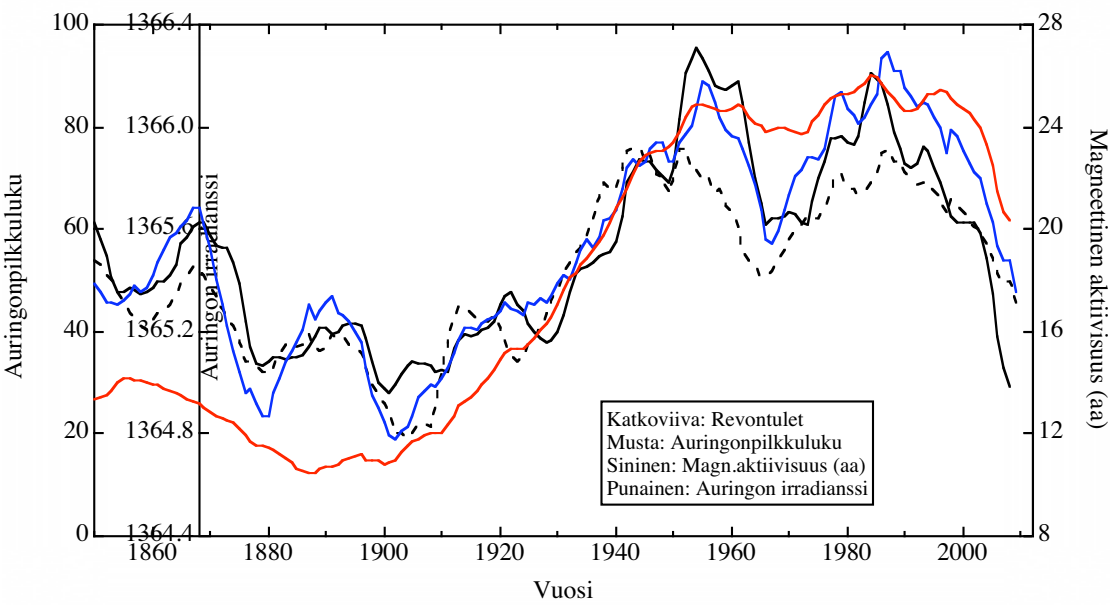
Kuva 3.18. Suomen revontuliöiden lukumäärän rekonstruktio 1780–2009.
Musta viiva: revontuliöiden lukumäärä 1780-1881 laskettuna maailmanaineistosta (LEGRAND and SIMON, 1987), joka on tilastollisesti suhteutettu Suomen havaintoaineistoon (1881–1964) (yhtälö 3.6).
Pisteviiva: Suomen revontuliöiden havaittu lukumäärä 1881–1964.
Pistekatkoviiva: revontuliöiden lukumäärä laskettuna magneettisen häiriöindeksin (*aa*) avulla (yhtälö 3.5).
Punaiset viivat: revontulimäärien trendit 1825–1900, 1900–1965 ja 1965–2009.
Harmaa alue: auringonpilkkuluku 1780–2009.

229 vuotinen rekonstruktio. Ajanjakso voidaan jakaa viiteen alajaksoon revontuliaktiivisuuden mukaan:

1. 1780–1800. Revontuliaktiivisuus oli huipussaan vuoden 1780 paikkeilla auringonpilkkujakson 3 maksimin (1778) jälkeen. Yhtä suuria revontulien esiintymislukuja on ollut vasta 1900-luvulla. 1780-luvulla auringon aktiivisuus on ollut erilaisista biologisista materiaaleista ja jäätikkökairauksista saatujen kosmogeenisten isotooppien (^{14}C, ^{10}Be) pitoisuustietojen mukaan suunnilleen samalla tasolla kuin 1900-luvun voimakkaimpien auringonpilkkujaksojen huiput (MUSCHELER et al., 2005; FRÖHLICH and LEAN, 2004).

2. Daltonin auringonpilkkujen minimikausi 1895–1825. Auringonpilkkujaksojen 5 ja 6 pilkkuhuiput olivat noin 50 % pienempiä kuin niitä edeltävät ja seuraavat jaksot. Auringon yleinen aktiivisuus oli tuona aikana madaltuneella tasolla, mikä näkyy revontulihavaintojen vähäisyytenä keskileveysasteilla. Pohjoisessa napapiirin tuntumassa revontulia on kuitenkin havaittu säännöllisesti auringonpilkkujakson mukaisesti (vrt. s. 25). Ruotsin havaintotietojen mukaan (RUBENSON, 1879, 1882) Etelä-

Suomea vastaavilla levesyasteilla revontulihavaintoja tehtiin vain 15 kertaa 18:sta vuoden aikana 1807–1825, mikä vastaa hyvin HÄLLSTRÖMin (1847) tilastoissa kuvailtua lähes revontulitonta kautta 1805–1825. Revontulet palasivat voimallisesti Etelä-Suomen taivaalle keväällä 1827 Turussa tehtyjen havaintojen mukaan (HÄLLSTRÖM, 1847; ARGELANDER, 1867). Argelanderin muistiinpanojen mukaan muutamia päiviä Turun palon jälkeen 8.9.1827 taivaalle nousivat poikkeuksellisen komeat revontulet, joita nähtiin myös kauas Keski-Eurooppaan saakka (FRITZ, 1873).



Kuva 3.19. Revontulien määrän (katkoviiva), auringonpilkkuvun (musta), magneettisen aktiivisuuden (*aa*) (sininen) ja auringon säteilyvoimakkuuden (irradianssi; W/m^2) (punainen) vaihtelut 1800-luvun puolivälistä lähtien 11-vuoden tasoituksella.

3. Vuosien 1825–1900 revontulet. Revontuliöiden lukumäärä oli hieman yli 50 % 1900-luvun lopun revontulimääristä. Revontulien määrä väheni noin 2 yötä kymmentä vuotta kohden 11-vuotisen auringonpilkkujakson yli tasoitettuna (Kuva 3.18). Minimimäärä saavutettiin auringonpilkkuminimissä vuonna 1901, jolloin koko Suomessa kirjattiin vain 5 revontuliyötä.

4. Kasvavien revontulimäärien aika 1900–1965. 1900-luvun alusta lähtien 1960-luvulle saakka revontulien määrässä oli kasvutrendi noin 10 revontuliyön lisäys vuosikymmentä kohden. Näin 1960-luvun alussa revontuliöiden määrä oli lähes nelinkertaistunut vuosisadan alun tilanteeseen verrattuna. Revontulien esiintymisen kasvukausi päättyi kuitenkin nopeasti auringonpilkkujakson 20 (1965–1977) aikana.

5. Revontulien määrien kasvu pysähtyy 1965–2009. Neljän peräkkäisen auringonpilkkujakson (20–23) aikana revontulien määrässä ei ole havaittavissa systemaattista kasvua, vaan revontulien vuotuinen määrä auringonpilkkujaksojen aikana pysyi suunnilleen samana. Kauden lopulla 2008–2009 on selviä merkkejä auringon aktiivisuuden siirtymisestä entistä malammalle tasolle ja sen kautta revontulien esiintymisfrekvenssi ja magneettikentän häiriöt tulevat jäämään aikaisempia kausia alemmalle tasolle. Kuten Kuvista 3.17, 3.18 ja 3.19 voi päätellä, auringon aktiivisuus mitattuna revontulien ja magneettisten häiriöiden (*aa*-indeksi) määrällä, auringon säteilyvoimakkuus (irradianssi) ovat laskemassa alemmaksi kuin yli 80:een vuoteen.

4 REVONTULIHAVAINNOT II POLAARIVUODESTA NYKYAIKAAN

4.1 *II Polaarivuosi (1932–1933)*

Toinen Polaarivuosi toteutettiin 50 vuotta ensimmäisen Polaarivuoden jälkeen (1932–1933). Tämän jälkeen kansainvälinen tiedeyhteisö on koonnut voimansa vastaaviin laajoihin hankkeisiin kahdesti: Kansainvälisen Geofysiikan Vuoden (IGY; 1957–1958) ja Kansainvälisen Polaarivuoden (IPY; 2007–2009) aikana.

Ensimmäinen Kansainvälinen Polaarivuosi (1882–1883) oli tieteellisiltä tuloksiltaan onnistunut. Lisäksi se osoitti, että geofysiikan ja meteorologian aloilla on mahdollista toimia tuloksellisesti tiiviillä kansainvälisellä yhteistyöllä. Suomen tiedeyhteisöllä oli merkittävä kansallinen rooli Polaarivuoden ohjelmassa ja alan tutkimus- ja havaintotoiminta oli hyvin integroitunut kansainväliseen tiedeyhteisöön.

Tieteellisiltä tuloksiltaan Toinen Polaarivuosi ei ollut edeltäjänsä veroinen, vaikka geofysikaalisiin havaintoihin oli saatu runsaasti uusia havaintovälineitä ja -menetelmiä kuten esimerkiksi revontulien kamerakuvaukset ja ionosfäärin luotaukset radioaalloilla. Toisaalta 1920-luvun lopussa alkanut maailmanlaajuinen lamakausi supisti Polaarivuoden havaintoihin suunniteltuja resursseja.

Suomessa Polaarivuoden toimintaa johti Ilmatieteen laitoksella Jaakko Keränen[37]. Maahamme saatiin Polaarivuoden ajaksi täysimittainen magneettinen observatorio Petsamoon. Revontulikuvauksiin osallistuttiin Sodankylän observatoriossa, joka oli keskeinen geofysiikan alan toimintayksikkö ja tuohon aikaan ainoa observatorio maailmassa napapiirin sisäpuolella.

Vuonna 1913 perustettu Sodankylään geomagneettinen observatorio laajeni 1920- ja 1930-luvuilla laajeni geofysikaaliseksi observatorioksi (KATAJA, 1973; SUCKSDORFF et al., 2001). Observatorio kuului Suomalaisen Tiedeakatemian alaisuuteen vuoteen 1997 asti, jolloin Oulun yliopistosta tuli sille uusi isäntäorganisaatio. Sodankylän observatorion johtajana toimi vuodesta 1927 vuoteen 1945 Eyvind Sucksdorff (1899–1955), joka johti observatoriossa revontuliin liittyviä mittauksia 1930-luvulla osana II Kansainvälisen Polaarivuoden (1932–1933) ohjelmaa (SEPPINEN, 2004). Revontulihavainnot liittyivät revontulien korkeusmäärityksiin norjalaisen Störmerin suunnittelemalla erikoiskameralla (Kuva 4.1). Korkeusmittaukset olivat alkaneet Norjassa 1910-luvulla ja Störmerin johdolla tehtiin tuhansia mittauksia revontulien esiintymis--korkeuksista. Sodankylässä kuvausperiodi kesti yhdeksän vuotta 1928–1936. Parhaat ja tarkimmat tulokset revontulien korkeuksille saatiin, kun kuvaukset suoritettin samanaikaisesti kahdelta eri asemalta. Apuasemat sijaitsivat Vuotsolla ja Kelujärvellä muutamien kymmenien kilometrien etäisyydellä itse observatoriosta. Kuvia kertyi kaikkiaan yli 5000, mutta ne tuhoutuivat observatorion mukana Lapin sodassa vuonna 1944 ennen kuin niitä ehdittiin käyttää tieteellisiin tarkoituksiin (KATAJA, 1973).

4.2 *Kansainvälinen Geofysiikan Vuosi (1957–1958) ja revontulikamerat*

Kansainvälinen Geofysiikan Vuosi (IGY) 1957–1958 merkitsi geofysiikan tutkimuksessa valtavaa toiminnallista ja laadullista kasvua. Mukana oli tutkijoita noin 70:stä maasta. Avaruudessa tapahtuvat mittaukset alkoivat vuonna 1957. Revontulikameroita oli toiminnassa polaarialueilla yli 100 ja lisäksi tehtiin laajamittaisesti revontulien visuaalista havainnointia molemmilla pallonpuoliskoilla (CHAPMAN, 1957). Revontulikuvauksien ohella käytössä oli myös revontulivalon fotometrisiä laitteita eri

[37] Jaakko Keränen (1883–1979) oli Sodankylän observatorion ensimmäinen johtaja (1913–1917) ja sittemmin Ilmatieteellisen Keskuslaitoksen johtaja (1932–1953). Keräsen tieteellisiä tutkimuskohteita olivat geomagnetismi ja meteorologia.



Kuva 4.1. Vasemmalla: Sodankylän observatorion johtaja (1927–1945) Eyvind Sucksdorff (1899–1955) pitää kädessään revontulien korkeusmääritykseen tarkoitettua tähtäinlaitetta "Tähtelän" havaintotornissa.
Oikealla: Annikki Sucksdorff (1904–1986) valmistelee Störmer-revontulikameraa käyttökuntoon. Kamera on puulaatikon takana vasemmalla. Oikealla auringon säteilymittari. Kuvat ovat 1930-luvun alusta.

aallonpituuksille sekä revontulivalon kaltaisen valoilmiön ilmahehkun (airglow) mittauksia. Keskeisiä vaikuttajamaita revontulikuvauksissa olivat USA ja Neuvostoliitto

Eräs IGY:n merkittävimmistä tieteellisistä tuloksista saatiin koko polaarialueen kattaneen revontulikuvausten ja niiden kanssa samanaikaisten magneettikenttämittausten kautta. Tällöin selvisi revontulialueella tapahtuvat revontulien ja magneettikentän vaihtelujen aika-paikka dynamiikka magneettisten myrskyjen aikana. Keskeinen käsite tässä yhteydessä on alimyrsky, ja kuinka sen vaihtelut voidaan havaita kehitty-vän eri alueilla pitkin revontulivyöhykettä sekä optisissa havainnoissa että magneettikentän rekisteröinneissä (AKASOFU, 1968). Kyseessä oli merkittävin mag-netosfääritutkimuksen saavutus ennen laajamittaisia satelliittihavaintoja 1960-luvulta eteenpäin.

IGY:n aikana yleisin kameramuoto oli ASC (All-sky Camera), jonka perusmuodon oli suunnitellut STOFFREGEN (1955). Siinä puolipallon muotoisella peilillä saadaan kameran linssiin kohdistettua lähes 180° kulmassa koko taivaankansi. Ilmatieteen laitokselle ostettiin kaksi Stoffregen-kameraa, jotka aloittivat kuvauksensa Geofysiikan Vuoden alussa 1957. Kameroiden sijoituspaikat olivat Sodankylä (Geo-

fysiikan observatorio) (67.4°N; 26.6°E) ja Ivalo (68.6°; 27.5°E). Kuvaukset tapahtuivat 16 mm filmille minuutin välein.

Geofysiikan Vuoden revontulihavaintojen ohjelmaan kuuluivat vielä visuaaliset revontulihavainnot 8:lla lentosääasemalla. Lisäksi Aeron (nyk. Finnair) lentäjät merkitsivät muistiin havaitsemiaan revontulia pohjoisilla lennoilla. Visuaalisia havaintoja jatkettiin aina vuoteen 1969 saakka.

Ilmatieteen laitoksen revontulifilmit läpikäytiin visuaalisesti kuva kerrallaan. Kuvista laadittiin tietyn kansainvälisesti sovitun luokittelun mukaiset tiedot, joista käy ilmi revontulien esiintymismuodot ja -ajat puolen tunnin välein. Tällaiset ns. ASCA-plotit lähettiin geofysikaalisiin datakeskuksiin (WDC), mutta itse filmit taltioitiin Ilmatieteen laitokselle. Samankaltainen luokittelu tehtiin myös visuaalisille revontulihavainnoille. Revontulifilmien luokittelu jatkui IGY:n jälkeenkin aina filmikamerahavaintojen loppuun saakka vuoteen 1997 (kts. Luku 5). Kyseessä oli Quick-look -aineiston kokoamisesta tutkijoiden käyttöön mielenkiintoisten revontuliepisodien löytämiseksi osana laajempaa avaruussääilmiöiden tutkimista.

Ilmatieteen laitoksen revontulikuvaukset jatkuivat vielä IGY:n loputtuakin. Toiminta on ollut käynnissä aina näihin päiviin asti revontulikuvauksien muodostaessa olennaisen osan Ilmatieteen laitoksen avaruussäämonitorointia.

Ilmatieteen laitoksen revontulikameraverkkoa ja -laitteita kehiteltiin 1960- ja 1970-luvuilla edelleen. Ivalossa sijainnut AS-kamera siirrettiin vuonna 1961 Oulun lähelle Haukiputaalle (65.1°N; 25.5°E) (myöhemmin Kiiminkiin), jossa se oli toiminnassa aina vuoteen 1979 saakka. Uusi kuvauspaikka oli Utsjoen Kevo (69.8°N; 27.0°E) vuodesta 1964 lähtien. Siellä kameratoiminta on jatkunut yhtäjaksoisesti tähän päivään asti.

Vuonna 1964 Ilmatieteen laitoksella konstruoitiin uudenlainen AS-revontulikamera, joka oli parannettu versio alkuperäisestä Stoffregenin mallista (Kuva 4.2 ja 4.3). Myöhemmin kamerasta saatiin värikuvia ja samalla laitteen elektroniikkaa kehitettiin (HYPPÖNEN et al., 1974). Värifilmin etuna mustavalkoiseen verrattuna oli suurempi

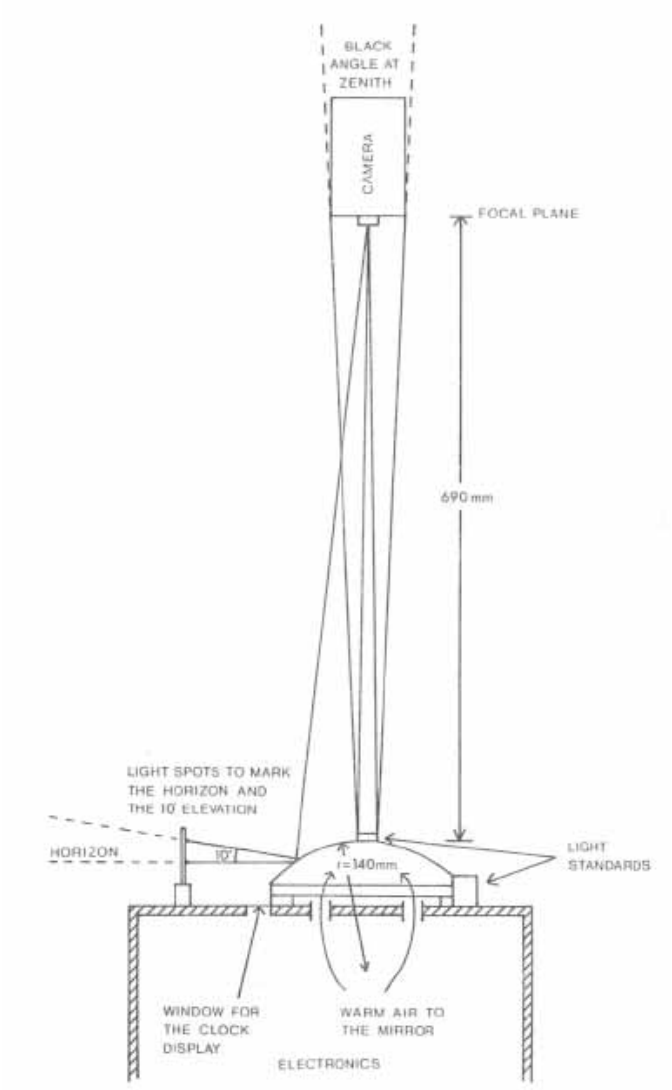
herkkyys ja mahdollisuus erottaa pilvimuodostelmat revontulista. Kirkkaimmat tähdet näkyvät filmillä, joka mahdollistaa kuvan absoluuttisen orientaation. Laitteessa kamera oli sijoitettu pallopeilin yläpuolelle. Peilin keskellä on vihreän revontulivalon vertailulähde, joka kuvautuu kameraan. Kamera kuvaa myös digitaalinäytöltä kellon-ajan. Kuvausväli oli 1 min, mutta sitä voitiin muuttaa nopeammaksi aina 20 s saakka. Valotusaika oli säädetty tavallisesti 2 sekuntiin, mutta pitemmätkin ajat olivat käytössä himmeämpien revontulimuotojen kuvaamiseksi. Kameran toimintaa ohjattiin manuaalisesti. Kuvatut filmit tallennettiin myöhemmin videonauhalle (BetaCam, VHS). Koko alkuperäinen ASC-filmimateriaali on arkistoitu Suomen Elokuvasäätiön filmivarastoon.



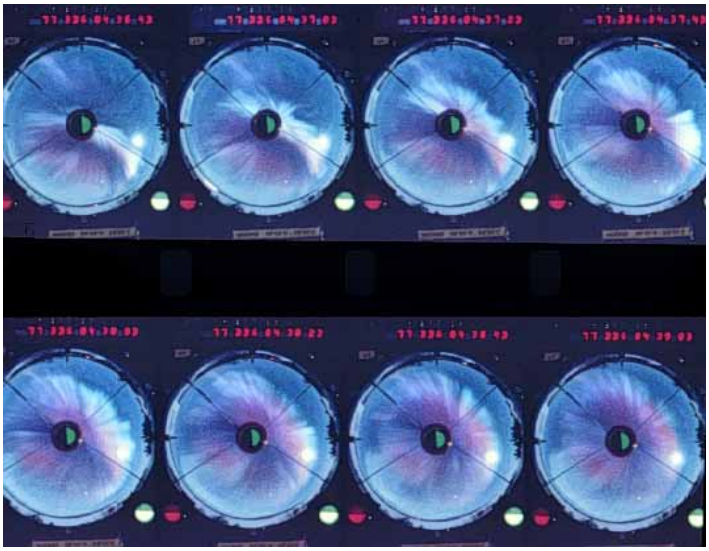
Kuva 4.2. Ilmatieteen laitoksen All-Sky-kamera (vrt. Kuva 4.3) Sodankylässä 1980-luvulla. Alemman laiteosan päällä on pallopeili, jonka yläpuolella on kamera suojuksen sisällä.

Revontulifilmien tutkimuskäytön tukena olivat ns. "Quick-Look" - taulukot, joihin oli koottu indeksoitua tietoa mm. revontulimuodoista, niiden kirkkaudesta ja pilvistä.

Taulukoista voi paikantaa tarkempia tutkimuksia varten mielenkiintoisia aktiivisia revontulitilanteita. Huomattava kehitys filmien analysoinnissa oli revontulikuvien digitalisointimenetelmä, jolla revontulikaarien tai muiden säännöllisten valomuotojen paikat ja korkeudet saatiin selville muutaman kilometrin tarkkuudella (KAILA, 1981).



Kuva 4.3. Ilmatieteen laitoksen All-Sky-kameran kaaviokuva (HYPPÖNEN et al., 1974). Revontulikamera on ylhäällä peilin yläpuolella. Kyseessä on vuonna 1973 käyttöön otettu malli, joka kuvasi revontulia värifilmille. Laitteita oli Suomessa käytössä enimmillään 8 aina vuoteen 1997 saakka (NEVANLINNA and PULKKINEN, 2001).



Kuva 4.4. Esimerkki Ilmatieteen laitoksen All-Sky-kameran ottamista revontulikuvista. Kuvassa ympyrän reunaviiva on horisontti, pohjoinen on vasemmalla ja taivaanlaki keskellä, missä näkyy vihreä valostandardi (alhaalla oikealla on punainen ja vihreä valostandardi). Punaiset numerot oikealla ilmoittavat päivämäärän ja kellonajan.

Ensimmäiset tieteelliset tutkimukset, joissa merkittävällä tavalla hyödynnettiin Ilmatieteen laitoksen revontulikuvia julkaisi PELLINEN (1979) polaarialueen alimyrskyihin liittyviä magnetosfääriprosesseja tarkastelevassa väitöskirjatyössään.

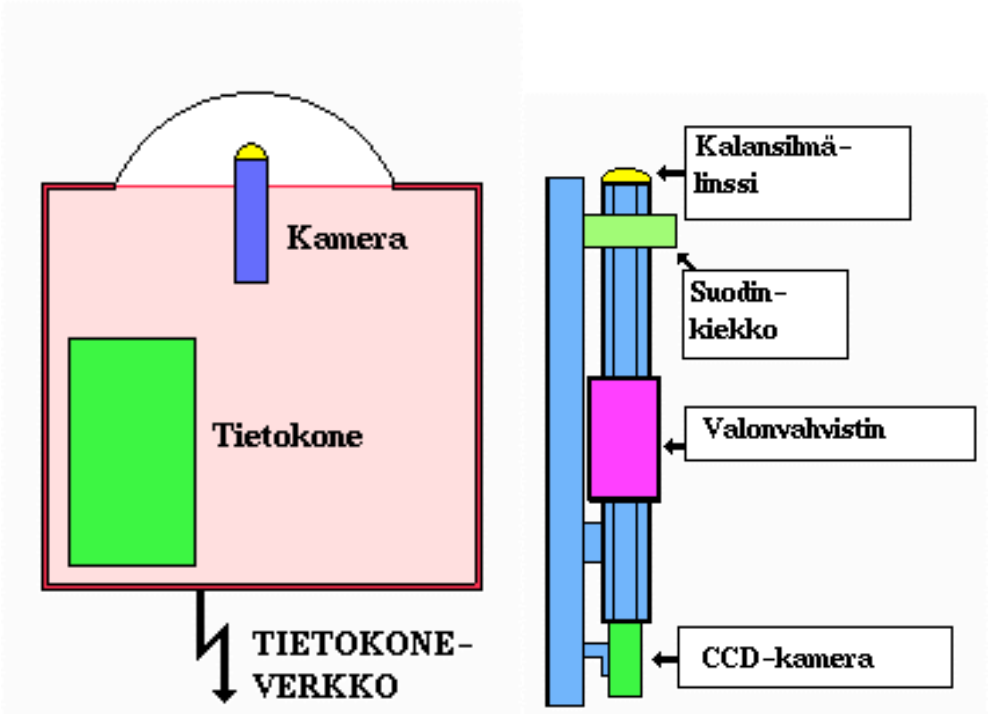
4.3 *CCD-kamerat revontulikuvauksissa (1996–)*

Ilmatieteen laitoksen vanha filmille kuvaava kamerajärjestelmä modernisoitiin perinpohjaisesti 1990-luvun puolivälissä ja uudet kamerat koekäytettiin talvella 1995–96. Käytössä on nyt (2009) Nyrölässä (62.3°N; 25.5°E), Kilpisjärvellä (69.1°N; 20.8°E), Kevolla (69.8°N; 27.0°E), Muoniossa (68.0°N; 23.6°E) ja Huippuvuorilla (Longyearbyen; 78.2°N; 15.7°E) CCD-tekniikkaan (Charge Coupled Device) perustuvat kamerat, jotka kuvaavat revontulet suoraan tietokoneen muistiin (Kuva 4.10). Kameroiden kuvaamaa taivaannäkymää voidaan tarkastella reaaliajassa kaikilta asemilta (SYRJÄSUO, 2001a, 2001b). Koekäytössä on myös kamera Ilmatieteen laitoksen päärakennuksen Dynamicumin katolla Kumpulassa (60.2°N; 25.0°E). Lisäksi Oulun yliopiston Sodankylän observatorio ylläpitää kahta kameraa.

Revontuliasemien laitteisto koostuu varsinaisesta revontulikamerasta, ohjaustietokoneesta ja tukilaitteistosta. Tukilaitteistoon kuuluvat tarkkuuskellona toimiva GPS-

satelliittivastaanotin ja akkulaitteisto katkottoman sähkövirran varmistamiseksi. Kamera on asennettu sisätiloihin läpinäkyvän kuvun alle (Kuva 4.7) ja suunnattu kohti zeniittiä. Aseman yleiskuva on esitetty Kuvassa 4.5.

Revontulikamerat on valmistanut amerikkalainen KeoConsultants (nykyisin Keo Scientific Ltd). Kameroissa käytetään ns. kalansilmälinssiä (näkökenttä 180°), jonka avulla koko taivaan (all-sky) kuva saadaan mahtumaan yhteen kuvaan. Kameran muut osat ovat mekaaninen suljin, suodinkiekko, kuvanvahvistin ja CCD-kamera. Vuodesta 2001 lähtien verkkoa on asteittain uusittu kameroilla, jotka ovat niin herkkiä, ettei kuvanvahvistimia enää tarvita. Signaalin vahvistaminen tapahtuu CCD-kennon sisällä uudella EM-tekniikalla (Electron Multiplying CCD).



Kuva 4.5. Revontulikameran toimintakaavio. Aivan uusimmissa kameroissa ei enää käytetä valonvahvistinta, vaan kamerat perustuvat kehittyneempään CCD-tekniikkaan (EMCCD).



Kuva 4.6. Ilmatieteen laitoksen All-Sky kamera Nyrölän (62.3°N; 25.5°E) observatoriossa. Puolipallon muotoisen kuvun sisällä on ylöspäin suunnattu revontulikamera (vrt. Kuva 4.5 ja 4.7). Kupu on materiaaliltaan ja optisilta ominaisuuksiltaan sellainen, ettei se vääristä näkyvää revontulispektriä. Sisällä on lämmitys, jotta kuvun pinta pysyy sulana.



Kuva 4.7. KeoHorizon-revontulikamera, joka kuvaa revontulien värit. Oikealla näkyy kameran kalansilmälinssi. Kamera on käytössä Helsingissä (Dynamicum), Kevolla ja Muoniossa. Kilpisjärvellä ja Sodankylässä toimii EMCCD-tekniikkaa soveltavat kamerat.

Vanhempien CCD-kameroiden suodinkiekossa on seitsemän paikkaa, joista kolmessa on interferenssisuotimet keskiaallonpituuksilla 557.7 nm, 427.8 nm ja 630.0 nm (kaistanleveys 2.0–3.0 nm). Nämä ovat näkyvällä aallonpituusalueella revontulien voimakkaimmat sävyt. Uudemmissa EMCCD-kameroissa on suodinkiekossa myös taustasäteilyn poistomahdollisuus, jolla voidaan eliminoida kuun aiheuttamat valo--häiriöt.

Ilmatieteen laitoksella on käytössä myös värikameroita, joissa sisäänrakennettu mosaiikkimainen suodatinpinta mahdollistaa revontulien kuvauksen väreissä (Keo-Horizon, Kuva 4.7).

CCD-kamera tuottaa 512 x 512-kokoisen kuvan, joka digitoidaan 8-, 14- tai 16-bittisiksi tietokoneessa olevalla kuvankaappauskortilla (Kuva 4.8). Tyypillisesti valotusaika on puolesta sekunnista neljään sekuntiin, mutta kameraa voidaan myös käyttää TV-moodissa (25 kuvaa sekunnissa).

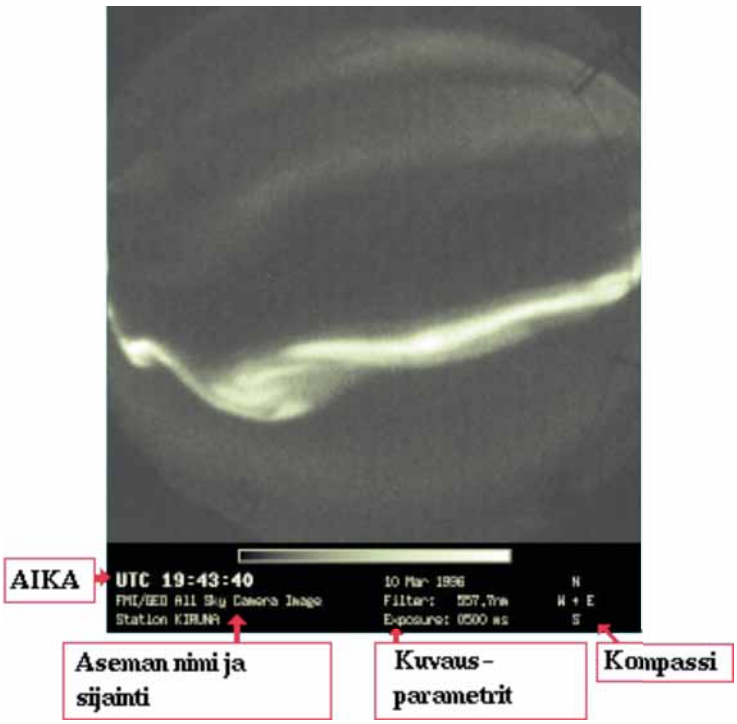
Revontuliaseman toimintaa ohjaa PC-tietokone. Käyttöjärjestelmänä on Linux, joka mahdollistaa moniajon ja täydellisen kauko-ohjauksen. Tietokoneet on yhdistetty Ilmatieteen laitoksen tietokoneverkkoon.

Pääperiaatteena kuvauksissa on se, että kuvia otetaan aina (20 s välein), kun on riittävän pimeää. Satelliittivastaanottimesta saadaan tarkka aika, jonka perusteella lasketaan Auringon paikka taivaalla. Kun Aurinko on yli 10 astetta horisontin alapuolella, on riittävän pimeää onnistuneilla revontulikuvauksille.

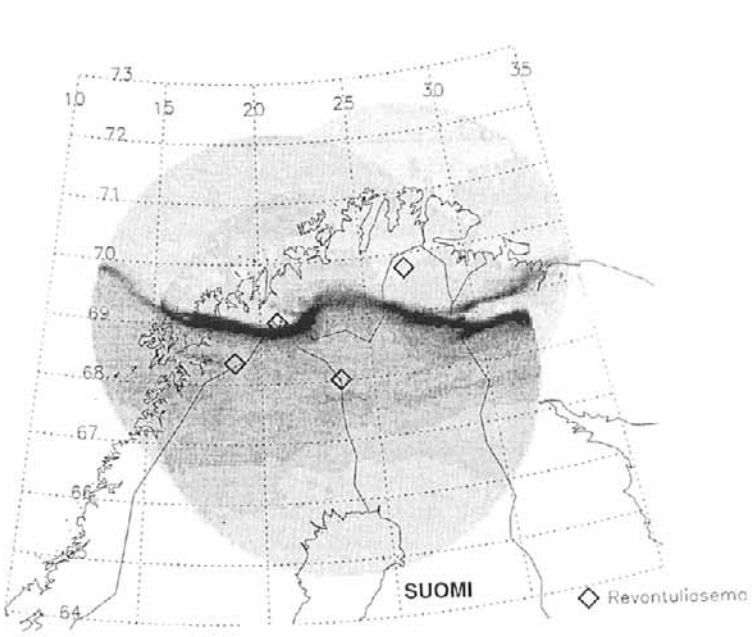
Kuvassa 4.9 on esimerkki CCD-kameroiden tuottamien revontulikuvien käytöstä. Kolmen aseman (Kevo, Muonio ja Kilpisjärvi) kuvaama revontulikaari on tulostettu karttapohjalle, jolloin revontulimuodot nähdään havainnollisesti ikäänkuin avaruudesta tarkasteltuna.

Revontulikuvat analysoitiin aikaisemmin manuaalisesti filmikameroista, mikä oli aikaavievää, hankalaa ja virhealtista työtä. CCD-kameroiden tuottamat kuva-aineistot voidaan analysoida automaattisesti ja soveltaa siinä kuvankäsittely ja konenäkötekniikoita erilaisten revontulimuotojen (esim. kaaret, läiskät) etsinnässä (SYRJÄSUO and DONOVAN, 2002, 2004).

Revontulikameroiden ja magnetometriasemien verkon (MIRACLE) havaintopisteet on esitetty Kuvassa 4.10. Verkko koostuu 7:stä revontulikamerasta ja 30:sta magnetometristä (IMAGE-aliverkko). Eteläisin havaintopaikka on Viron Tartossa (TAR) ja pohjoisin Huippuvuorten Ny Ålesundissa (NAL). Näiden välimatka on yli 2000 km. MIRACLE-toimintojen koordinointi (PI-status) ja aineiston kokoaminen tapahtuu Ilmatieteen laitoksella. Hankkeessa on mukana 8 valtion alan tutkimusorganisaatiot (aakkosjärjestyksessä: Italia, Norja, Puola, Ruotsi, Saksa, Suomi, Venäjä ja Viro).



Kuva 4.8. ASC:n kuvanäkymä oheistietoineen. Kuvan keskellä suunnilleen zeniitissä on revontulikaari.

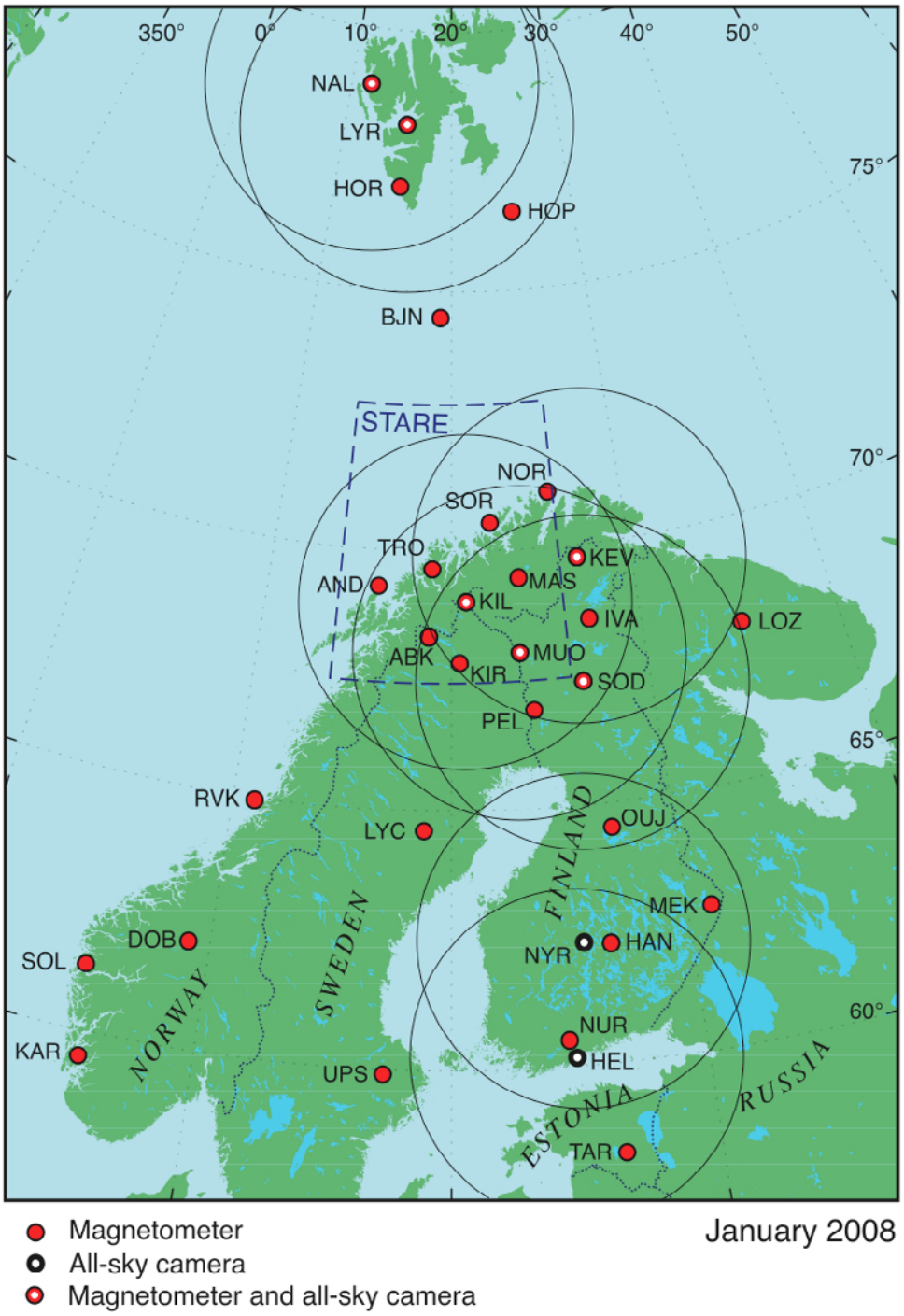


Kuva 4.9. Kolmen CCD-revontulikameran (Kilpisjärvi, Kevo ja Muonio) ottama kuva revontulikaaresta Lapin taivaalla 18.3.2001. Tumma itä-länsisuuntainen aaltomuoto on kuvista yhdistetty revontulikaari, joka on tulostettu karttapohjalle. Harmaat osittain päällekkäiset vyöhykkeet näyttävät revontulikameroiden havaintoalueet. Kolmen kameran yhteinen näkökenttä ulottuu pohjois-eteläsuunnassa Oulusta Jäämerelle. (Kuva: Mikko Syrjäsuo).

Viime vuosina MIRACLE-mittauksia on ruvettu käyttämään yhä enenevissä määrin avaruussään havainnointiin. Siihen liittyvä tutkimus ja havainnointi pyrkii mittausaineistojen analyysin ja teoreettisen mallinnuksen avulla ymmärtämään ja ennustamaan auringon, planeettojen välisen avaruuden ja planeettaympäristöjen käyttäytymistä ja tilaa sekä niihin vaikuttavia häiriöitä. Päämääränä on myös selvittää, havainnoida ja ennustaa avaruussään vaikutuksia teknisille järjestelmille avaruudessa ja maan pinnalla sekä mahdollisia biologisia efektejä.

MIRACLE-verkolla on takanaan monta edeltäjää ja sen historia voidaan katsoa alkaneen jo Polaarivuosien ohjelmista. Nykyisen verkon välitön edeltäjä oli Fennoskandian alueella 1970-luvun puolivälistä asti toiminut magnetometriverkko. Erityisen laaja ja tiheä magnetometriverkko rakennettiin vuosiksi 1976-1979 kansainvälisen magnetosfääritutkimushankkeen ajaksi (International Magnetospheric Study, IMS) (RUSSELL and SOUTHWOOD, 1982). Vuonna 1982 rakennettiin EISCAT- tutkan ympäristöön uusi magnetometriverkko (EISCAT Magnetometer Cross), jota laajennettiin vuonna 1990. Samassa yhteydessä verkon nimeksi annettiin IMAGE (International Monitor for Auroral Geomagnetic Effects).

IMS-vuosina rakennettiin magnetometriverkon mittauksia tukemaan STARE (Scandinavian Twin Auroral Radar Experiment) ionosfääritutka (GREENWALD et al, 1978) (Kuva 4.10), jonka toinen lähetinasema oli Hankasalmella ja toinen asema Norjassa. STARE toimi vaihtelevassa määrin aina 1980-luvun puoliväliin asti, mutta sen jälkeen mittaukset jouduttiin lopettamaan vanhenneen teknologian vuoksi. 1990-luvun loppupuolella STARE:n teknologiaa uusittiin siten, että tutkalla voitiin vuosien 1997-2005 aikana tehdä yhteismittauksia IMAGE:n ja IL:n digitaalisten revontulikameroiden kanssa. Näiden mittalaitteiden muodostamaa verkostoa kutsutaan nimellä MIRACLE (Magnetometers – Ionospheric radars – All-sky Cameras Large Experiment). MIRACLE luotiin 2000-luvun alussa tukemaan erästä ESA:n satelliittiohjelmaa (Cluster), jossa maanpintahavaintoja hyödynnettiin magnetosfäärin ja ionosfäärin vuorovaikutuksien tutkimuksissa (AMM et al., 2005).



Kuva 4.10. MIRACLE-verkon havaintopisteet. Punaisella merkityt havaintopaikat ovat magnetometriasemia (IMAGE-verkko). Punainen täplä lisättynä valkoisella merkillä tarkoittaa All-Sky kameraa. Ympyrät näyttävät keskipisteessä olevan revontulikameran näkökentän, jonka säde on noin 300 km.
Suorakaide, johon on merkitty STARE viittaa Hankasalmella (HAN) sijainneeseen (1977–2005) revontulitutkaan (Doppler).
Ilmatieteen laitoksen All-Sky kameroita ovat HEL (Helsinki), NYR (Nyrölä), MUO (Muonio), KIL (Kilpisjärvi), KEV (Kevo) ja LYR (Longyearbyen). Alueella on myös Oulun yliopiston Sodankylän observatorion (SOD) revontulikamerat ja italialaisen avaruustutkimusorganisaation (IFSI/CNR) ylläpitämä revontulikamera NAL (Ny Ålesund) Huippuvuorilla.

5 REVONTULIEN ESIINTYMISTILASTOJA 1973–2008

Luvussa 3 tarkasteltiin revontulien esiintymisfrekvenssien pitkäaikaisvaihteluja vuodesta toiseen. Havaittujen revontuliöiden lukumäärät seuraavat auringon aktiivisuuden yleistä kehitystä auringonpilkkujen esiintymisen 11-vuotisessa jaksollisuudessa (Kuvat 3.15–3.17). Kuukaudesta toiseen tapahtuvassa revontuliaktiivisuuden muutoksissa voidaan erottaa vuodenaikaisvaihtelu kevät- ja syys-maksimeineen (Kuvat 3.3–4), mutta tämän tarkempaan aikaresoluution ei ole mahdollista päästä. ASC-aineisto mahdollistaa revontulien esiintymisien tarkemman ja monipuolisemman tilastollisen tarkastelun. Filmeille kuvattu ASC-aineisto vuosilta 1964–1998 on visuaalisesti analysoitu kuvaruutu kerrallaan. Niistä on tehty revontulien muodoista ja sijainnista taivaalla sekä muista tiedoista kuten esimerkiksi pilvisyydestä revontuli-indeksit 15 min välein. Vuosien 1964–1972 indeksitietojen tilastollinen analyysi on suorittamatta, mutta tilastotutkimus vuosien 1973–1998 ajalta on tehty (NEVANLINNA and PULKKINEN, 2001). Kyseisessä analyysissä revontulimuodoista otettiin kolme eri tyyppiä seurantakohteeksi: homogeeninen kaari, säteettäinen kaari ja revontulipilvet. Lisäksi koottiin tiedot kirkkaasta taivaasta ilman revontulia ja pilvinen taivas tilanteet. Neljännestunnin tiedoista laskettiin tuntikohtaiset arvot kyseisistä seurantaparametreistä eri ASC-asemilta (Taulukko 5.1). Taulukko 5.2 näyttää minä vuosina eri asemilla on revontulia kuvattu.

Revontulien näkyvyystietojen ja pilvisyystietojen avulla määriteltiin (NEVANLINNA and PULKKINEN, 2001) revontulien näkyvyysindeksi *AO* (Auroral Occurrence) :

$$AO = 100\, A/(A + C), \tag{5.1}$$

missä A on niiden tuntien lukumäärä, jolloin kamera on kuvannut revontulia ja C saman ajanjakson puitteissa kuvatut kirkkaan taivaan tilanteet ilman revontulia. Näin *AO* ilmoittaa revontulien esiintymistodennäköisyyden prosentteina kirkkaina öinä. Synoptisten säähavaintojen yhteydessä tilastoidut revontuliyöt antavat tietoa yleensä illalla näkyvistä revontulista. ASC:n kuvat kartoittavat revontulien esiintymiset jatkuvasti koko yön ajalta. Kuvista määritetty *AO*-indeksi antaa siten tilastollisesti luotettavampaa tietoa revontulien esiintymisistä kuin pelkät revontuliöiden luku-määrät. *AO*-indeksi ei tee eroa kirkkaiden ja heikosti näkyvien revontulimuotojen välillä.

Taulukko 5.1. All-Sky-kameroiden havaintopaikat ja koordinaatit 1973–1998

Asema	Koordinaatit φ, °N	λ, °E
Hankasalmi (HAN)	62.31	26.65
Oulu (OUL)	65.11	25.49
Sodankylä (SOD)	67.36	26.64
Muonio (MUO)	68.03	23.56
Ivalo (IVA)	68.61	27.47
Kilpisjärvi (KIL)	69.05	20.79
Kevo (KEV)	69.75	27.02
Hornsund (HOR)	77.01	15.60

Taulukko 5.2. ASC-aineisto eri asemilla 1973–1998[a]

Vuosi	HAN	OUL	SOD	MUO	IVA	KIL	KEV	HOR
1973		x	x	x	x		x	
1974		x	x	x	x		x	
1975		x	x	x	x		x	
1976		x	x	x	x		x	
1977		x	x	x	x		x	
1978	x	x	x	x	x	x	x	
1979	x	x	x	x	x	x	x	
1980	x		x	x		x	x	x
1981	x		x	x		x	x	x
1982	x		x	x		x	x	x
1983			x	x		x	x	x
1984			x	x		x	x	x
1985			x			x	x	x
1986			x			x	x	x
1987			x	x		x	x	x
1988			x	x		x	x	x
1989			x	x		x	x	
1990			x	x		x	x	
1991			x	x		x	x	
1992			x	x		x	x	
1993			x	x		x	x	
1994			x	x		x	x	x
1995			x	x		x	x	x
1996				x		x	x	x
1997				x		x	x	x
1998							x	x
Yht.	3338	4125	30915	15356	3874	30790	22777	4289

[a] Taulukon alin rivi näyttää havaintotuntien kokonaismäärän kullakin asemalla. Kaikkiaan havaintoja on 127210 tuntia.

Aikana 1973–1998 kuvauksia tehtiin elokuusta huhtikuuhun. Näin on kertynyt 26 vuoden aineisto revontulien esiintymisistä Pohjois-Suomessa. Yksittäisiä revontulikuvia on otettu noin 7.5 miljoonaa, mikä vastaa yhtäjaksoisesti noin 14 vuotta kestävää revontulifilmiä. Kuvaustunteja on yli 125 000, joista revontulilla valaistuja on noin 40 000. Yhden kuvausvuoden aikana filmiä on kulunut tavallisesti pari kilometriä. Havaintojaksoon 1973–1998 osuu kolme auringonpilkkuminimiä: 1976, 1986

ja 1996 sekä kaksi maksimia: 1979 ja 1989. Havaintoperiodi alkaa auringonpilkkujakson 20 laskevalta kaudelta ja päättyy pilkkujakson 23 nousevalle kaudelle.

Kuva 5.1 esittää revontulien vuotuista esiintymistodennäköisyyttä (*AO*) Lapissa 1973–1997 ASC–aineistosta määritettynä. *AO*-indeksi vaihtelee 50 % ja 80 % välillä. Sen keskimääräinen arvo on 69 %. Vuodesta toiseen olevissa *AO*-luvuissa on yleinen nouseva kehityskulku 1975–1993, jonka jälkeen luvut putoavat kahdessa vuodessa olennaisesti alemmalle tasolla. Näin *AO*-indeksi ei seuraa hyvin auringonpilkkuluvun vaihtelua. Erityisesti pilkkujaksojen 21 lopulla ja jakson 22 alussa (1984–1989) indeksi pysyy keskimääräistä korkeammalla tasolla monen vuoden ajan. Auringonpilkkuluku ei ole siten erityisen spesifinen mittari niille magnetosfääriprosesseille, jotka johtavat All-Sky kameroihin tallentuviin optisiin revontuliin. Toisaalta visuaaliset revontulihavainnot noudattavat hyvin auringonpilkkujen vaihtelua vuositasolla aurinkosyklin 11-vuotisessa kulussa (Kuva 3.15), mutta kyseessä on silloin alkuillan voimakkaat revontulet, jotka seuraavat pilkkuaktiivisuutta ja magneettikentän yleistä häiriöisyyttä. *AO*-indeksiin sisältyy koko yön revontulivalot niiden intensiteetistä riippumatta, jolloin heikostikin näkyvät revontulet kartuttavat indeksiä.

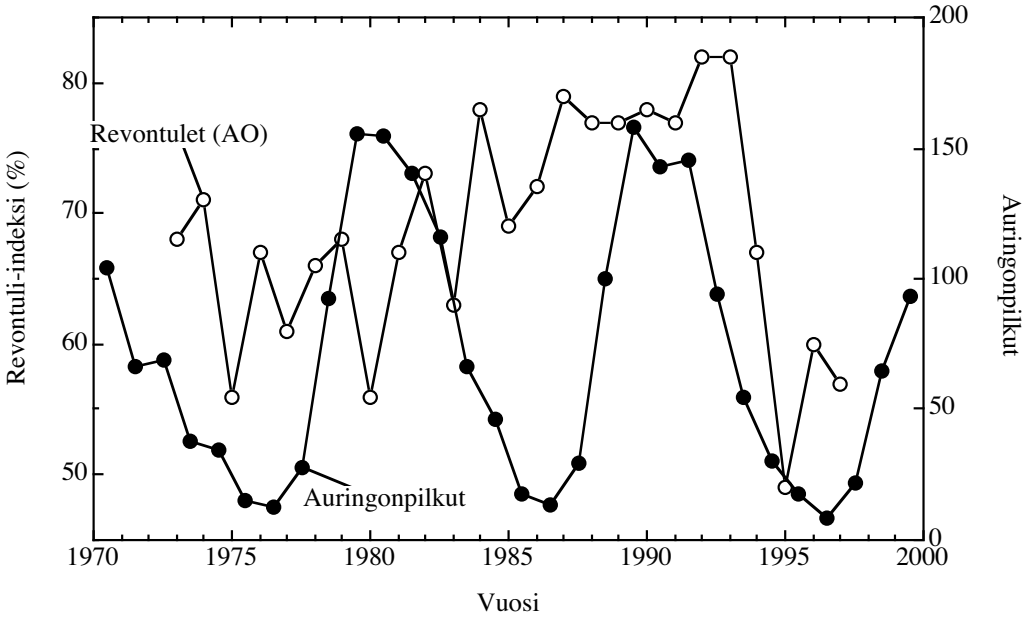
Parempi yhteensopivuus revontulien näkyvyysindeksille (*AO*) saadaan aurinkotuulen ominaisuuksia kuvaavien suureiden kanssa, joiden kautta auringon aktiivisuus välittyy revon-tulialueille. Eräs tällainen tekijä on aurinkotuulen sähkökenttä E_y, joka on Kuvassa 5.2 yhdessä revontuli-indeksin *AO* kanssa. E_y on maapallon suhteen aamu-iltasuuntainen. Sähkökentälle pätee $E_y = VB_z$, missä V on aurinkotuulen nopeus ja B_z aurinkotuulen interplanetaarisen magneettikentän z-komponentti (maapallon pyörimisakselin suuntainen pohjois-eteläkomponentti). Sähkökentän tiedetään vahvistavan magnetosfäärin konvektiota alimyrskytilanteessa (B_z:n ollessa negatiivinen), jolloin revontulimuodostumista tapahtuu. Muulloin sähkökentän vaikutus on vähäisempi, mutta ilmeisesti se on aina vaikuttamassa, koska revontuliaktiivisuus seuraa vuodesta toiseen sähkökentän muutoksia (Kuva 5.2).

Sähkökentän aikavaihtelu auringonpilkkujakson puitteissa ei noudata 11-vuotista pilkkujaksoa, vaan pikemmin sen kaksinkertaista kestoa eli 22 vuotta, joka on auringon oman jaksollisen magneettikenttäpolariteetin kokonainen jakso. Siinä *E*:n huippu-

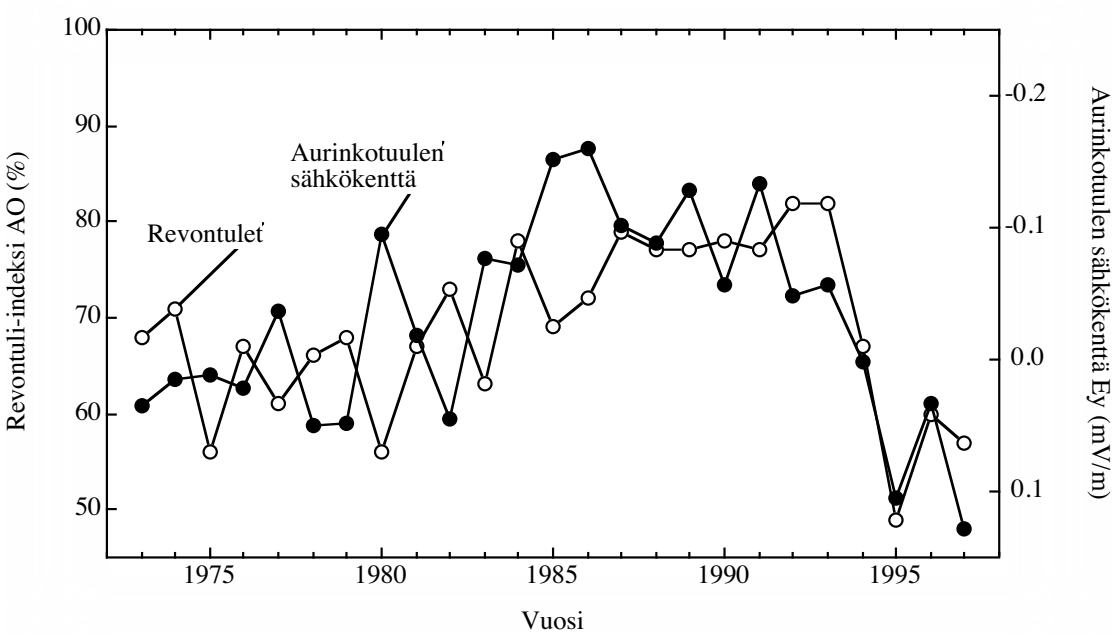
arvot sijoittuvat 1980-luvun puolivälin jälkeen ja minimit 1970- ja 2000-luvun alkuun. Näin siis varsin yksinkertaisesti määritelty *AO*-indeksi pitää sisällään aurinkotuulen ja magnetosfäärin prosesseja kuvaavaa olennaista avaruussääinformaatiota.

AO-indeksin ja aurinkotuulen muiden parametrien väliisiä tilastollisia yhteyksiä ovat tutkineet NEVANLINNA and PULKKINEN (1998) ja PULKKINEN et al., (2001).

Kuva 5.3 esittää AO-indeksin keskiarvon ja hajonnan havaintokaudella 1973–1997 eri ASC-asemilla leveysasteen funktiona. Kuvasta nähdään, että Suomessa eniten revontulia voi nähdä Kilpisjärvellä (KIL). Taivaan ollessa kirkkaana pimeään aikaan revontulia voi havaita siellä keskimäärin kolmena yönä neljästä (75 % öistä). Utsjoen Kevolla (KEV) tämä suhdeluku on noin 10 %-yksikköä pienempi. 100 % (revontulia näkyy jokaisenä selkeänä yönä) raja saavutetaan Jäämeren rannikolla Pohjois-Norjassa. Vielä pohjoisempana revontuliovaalin sisäpuolella niiden määrä taas pienenee kuten havaitaan Huippuvuorilla sijaitsevan Hornsundin (HOR) *AO*-luvusta.



Kuva 5.1. Ympyräviiva: Revontulien esiintymistodennäköisyys (*AO*) Lapissa vuodesta toiseen 1973–1997 laskettuna ASC-aineistosta.
Palloviiva: Auringonpilkut.



Kuva 5.2. Palloviiva: Revontulien esiintymistodennäköisyys Lapissa (*AO*).
Pisteviiva: Satelliittihavainnoista määritetty aurinkotuulen sähkökenttä (E_y) NASA:n OMNIWeb-tietokannasta (http://omniweb.gsfc.nasa.gov/).

Eteläänpäin mentäessä revontuliöiden lukumäärä pienenee nopeasti. Sodankylässä (SOD) joka toinen yö nähdään revontulia, Oulun (OUL) alueella joka viidentenä.

Auringonpilkkujakson aikana *AO*-luvut vaihtelevat keskiarvon suhteen ± 10 % pilkkujen esiintymisien mini- ja maksimivuosien välillä.

AO-luvun tilastollinen riippuvuus (magneettisesta) leveysasteesta (Φ) noudattaa eksponenttifunktion jakaumaa:

$$AO(\Phi) = 100e^{-[(\Phi-70°)/8]^2} \qquad (5.2)$$

jonka mukaan revontulien maksimaalinen esiintyminen on leveysasteella 70°N. Havaintoalueen ulkopuolelle Etelä-Suomeen tilastollinen riippuvuuslaki (4.2) ennus-- taa revontuli-indeksille lukemaa noin 5 %, mikä tarkoittaa keskimäärin 10 revon-- tuliyötä pimeään vuodenaikaan. Luku on sopusoinnussa synoptisten revontuli-havaintojen kanssa Etelä-Suomen osalta.

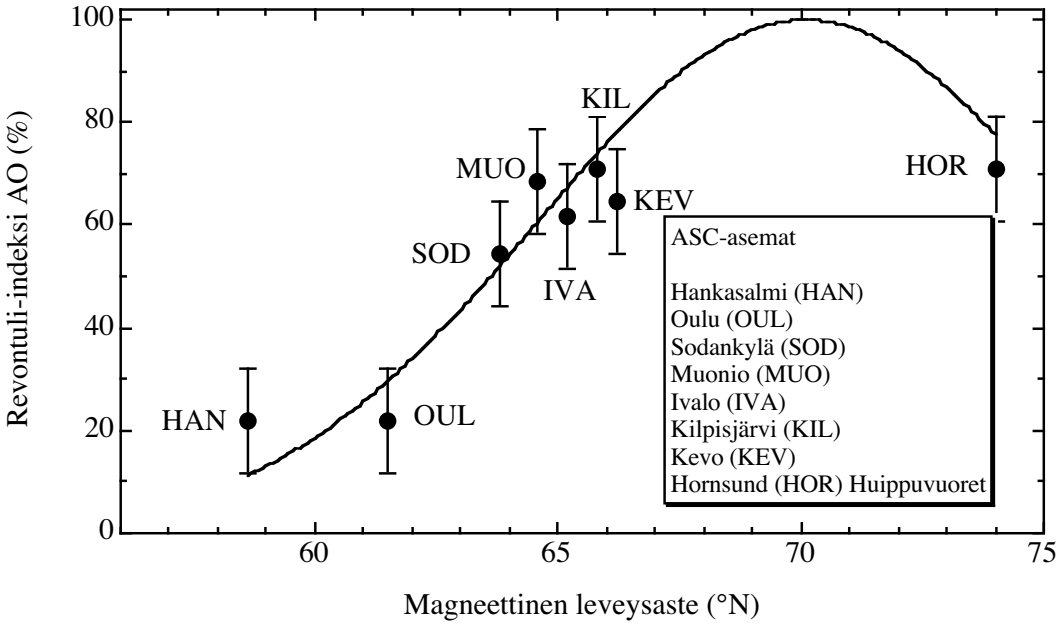
Revontulien määrä vaihtelee kellonajan mukaan. Kuvan 5.4 mukaan illalla kello 21 aikaan keskimääräinen esiintymistodennäköisyys (*AO*) Lapissa ylittää 50 %. Se

saavuttaa huippunsa heti keskiyön jälkeen, jolloin myös revontuliin liittyvät Maan magneettikentän häiriöt ovat suurimmillaan. Aamuyöstä revontulien määrä vähenee siten, että aamulla kello 6 aikaan niiden esiintymistodennäköisyys laskee alle 50 %.

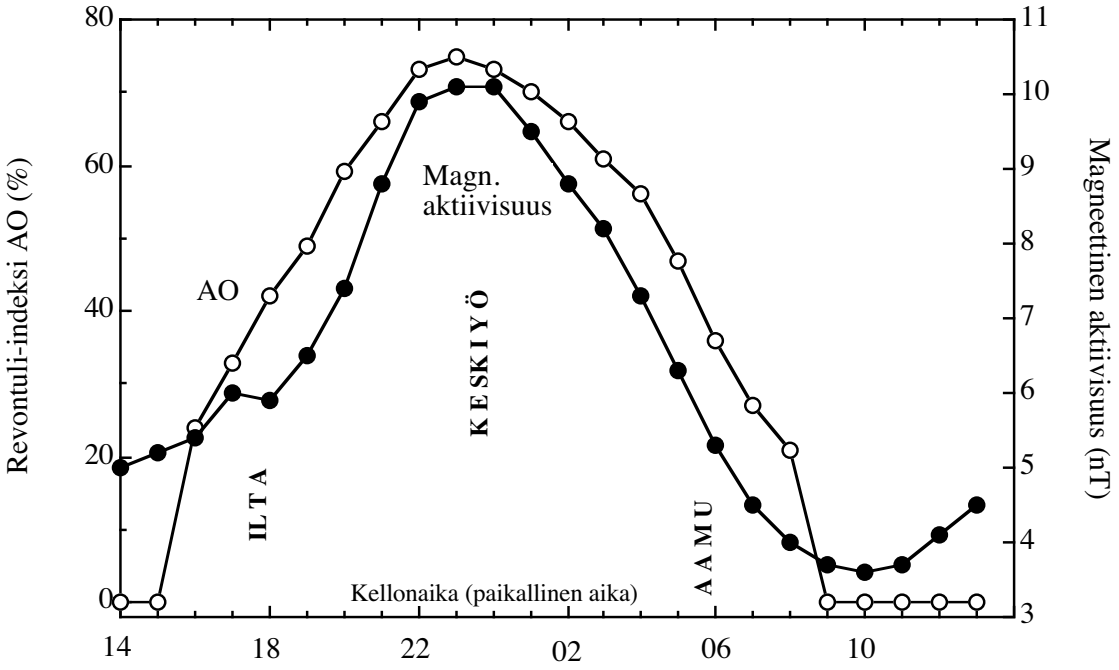
Revontulien ja magneettisen häiriöisyyden esiintymisen keskimääräinen vuorokausivaihtelu (Kuva 5.4) johtuu revontuliovaalin vuorokautisesta liikkeestä maapallon suhteen. Ovaalin symmetriakeskus on magneettisen (dipolinavan) kohdalla noin 1000 km maantieteellisestä navasta kohti Grönlannin luoteisrannikkoa. Ovaalin muoto on venynyt siten, että sen pituusakseli on kohti aurinkoa ja se pysyy paikoillaan maapallon pyöriessä ovaalin alla. Näin ilta- ja aamuyöstä revontulivyöhyke on kauempana havaintoverkon pohjoispuolella kuin keskiyöllä. Ovaalin eteläreuna on aktiivisten revontulimuotojen esiintymisalue keskiyön aikaan alimyrskyjen alkaessa. Niihin liittyy silloin myös voimakkaampia sähkövirtoja, jotka havaitaan maanpinnalla voimistuneena magneettisena häiriöisyytenä.

Kuva 5.5 näyttää miten eri ASC:lla havaitut revontulimuodot esiintyvät kellonajan funktiona. Aktiiviset muodot (säteet) ovat yleisimmillään (*AO* noin 75 %) keskiyön aikaan samoin kuin revontulien kaarimainen perusmuoto. Aamuyöllä taas vallitsevat läiskämäiset muodot, jotka liittyvät revontulialimyrskyn palautumisvaiheeseen niiden muodostuessa hajoavista kaarirakenteista revontulialueen eteläreunan tuntumassa. Vastaavan analyysin Kanadan revontulikameroiden verkosta (CANOPUS; DONOVAN et al., 2003) ovat tehneet SYRJÄSUO and DONOVAN (2004). Kyseessä oli CCD-kameroiden ottamista noin 350 000:sta revontulikuvasta 1993–1998. Revontulimuotojen tunnistus tapahtui kuvista automaattisesti konenäkömenetelmillä.

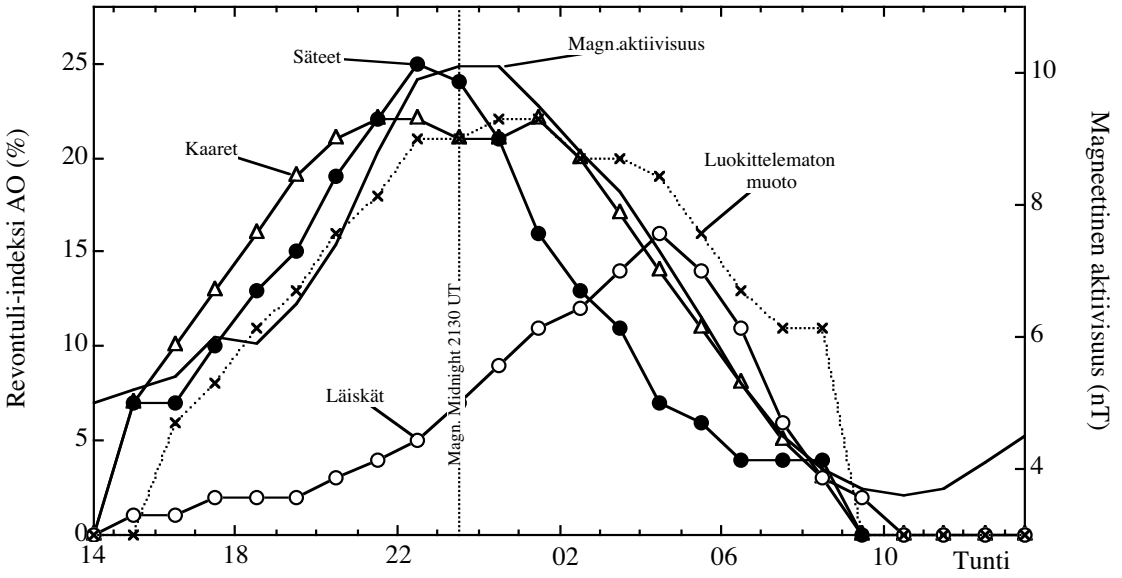
Kuvassa 5.6 on esitetty miten revontulien esiintymisindeksi (*AO*) vaihtelee kellonajan mukaan magneettisen häiriöisyystilanteen muuttuessa rauhallisesta pieneen myrskyyn, isoon myrskyyn ja hirmumyrskyyn. Magneettisesti rauhallisena aikana revontulien perusmuotojen esiintymisen huippuaika on keskiyöllä, jolloin *AO* on noin 50%. Illalla *AO* kasvaa ja aamuyöllä se vähenee. Magneettisten myrskyjen aikaan revontulia nähdään lähes koko pimeän ajan suunnilleen samalla todennäköisyydellä, varsinkin erittäin voimakkaiden myrskyjen ollessa käynnissä. Tällöin esiintymistodennäköisyys on 80-95 %.



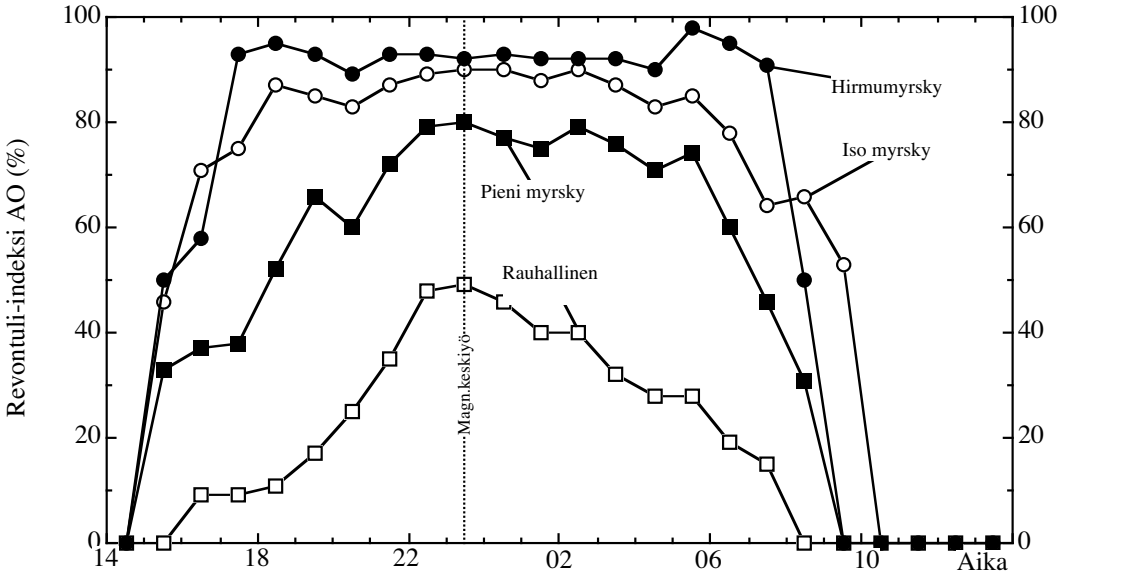
Kuva 5.3. Pallot: Revontuli-indeksin (*AO*) riippuvuus (magneettisesta) leveysasteesta eri revontuli-asemilla. Jana osoittaa *AO*:n hajonnan koko havaintokaudella 1973–1997.
Viiva: *AO*:n tilastollinen jakauma yhtälön (4.2) mukaan.



Kuva 5.4. Ympyräviiva: Revontulien esiintymisindeksi *AO* kellonajan mukaan Lapissa ASC-tilastojen mukaan 1973–1997.
Palloviiva: Magneettinen aktiivisuus laskettuna Sodankylän magneettisen observatorion rekisteröintien (*X*-komponentti) minuuttiarvojen keskihajonnasta kullekin tunnille.



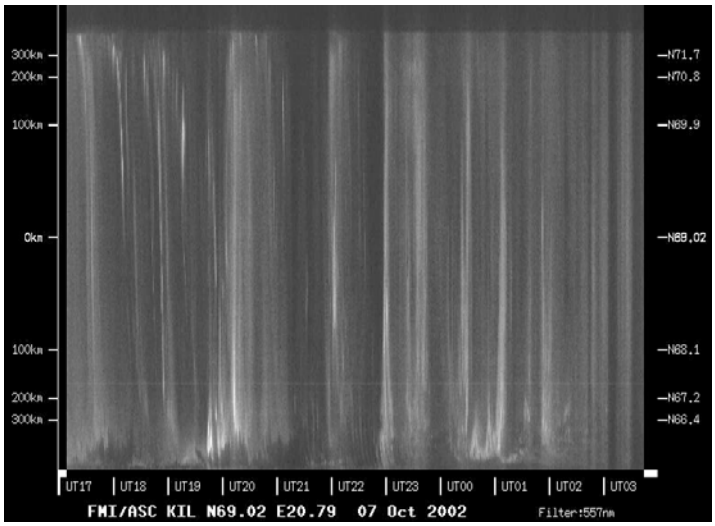
Kuva 5.5. Eri revontulimuotojen esiintymistodennäköisyydet (*AO*) kellonajan mukaan (paikallista aikaa) Lapissa 1973–1997.
Kolmiot: Kaarimaiset revontulimuodot
Pallot: Sädemaiset revontulet
Ympyrät: Läiskämäiset muodot
Ristit: Luokittelemattomat revontulimuodot
Viiva: Magneettinen häiriöisyys Sodankylässä (vrt. Kuva 4.10).



Kuva 5.6. Revontulien esiintymistodennäköisyydet (*AO*) magneettikentän häiriöisyyden suhteen eri kellonaikoina Lapissa 1973–1997.
Avoneliöt: Magneettikenttä rauhallinen
Neliöt: Pieni magneettinen myrsky
Ympyrät: Suuri magneettinen myrsky
Pallot: Magneettinen hirmumyrsky

Ilmatieteen laitoksen CCD-tekniikkaan perustuvat All-Sky kamerat aloittivat kuvauk--set syksyllä 1996 kuudella asemalla (kts. Kuva 4.10) osana MIRACLE-verkon avaruussäämonitorointia. Jokaisen yön kuvauksista tehdään automaattisesti yhteenveto ns. keogrammin[38] (Kuva 5.7) muodossa, mistä yhden aseman revontulet nähdään eri kellonaikoina ja millä korkeudella taivasta revontulet ovat sijainneet. Keogrammit ja niihin liittyvä muu revontulikuvauksien metadata ovat Ilmatieteen laitoksen www-sivuilla. Keogrammien kuvatiedoista voi rekonstruoida revontulien esiintymistilastoja ajalle 1996–2008, jolloin ne täydentävät filmikameroista saatuja tietoja revontulien esiintymisfrekvensseistä.

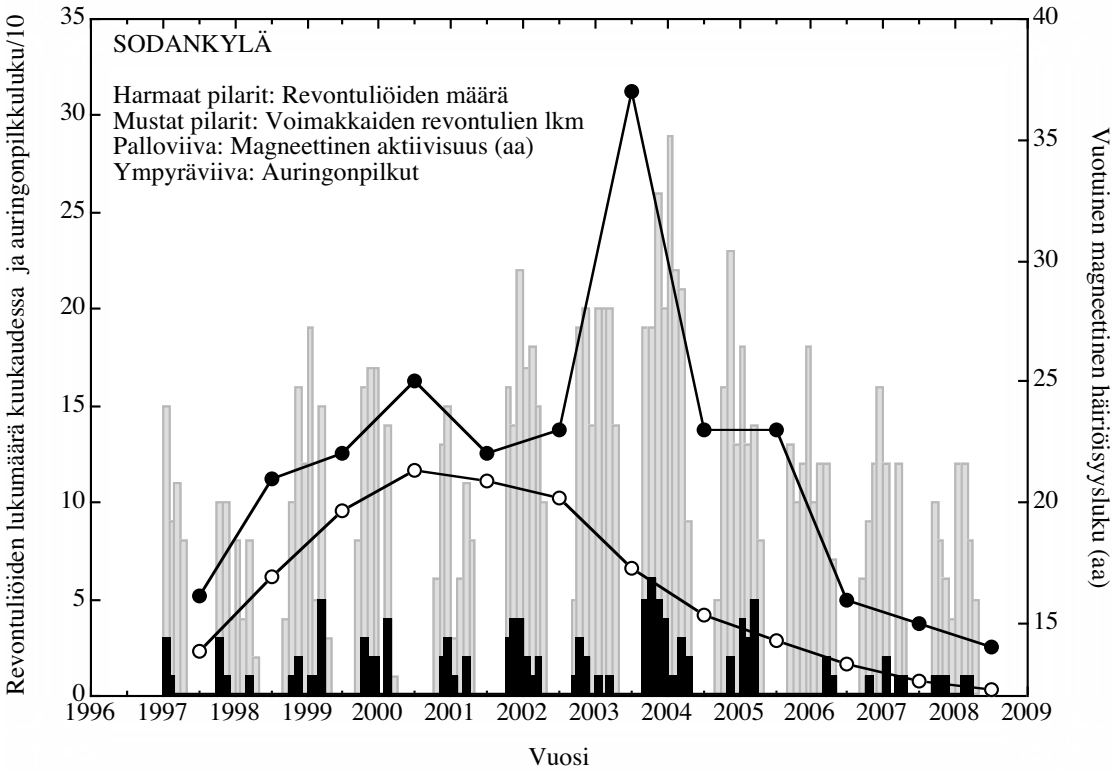
Kuvassa 5.8 on Sodankylän All-Sky-kameran kuvista koottu revontuliöiden kuukausittainen vaihtelu 1996–2009, joka kattaa lähes kokonaan auringonpilkkujakson 23. Revontuliyöksi on otettu kaikki sellaiset yöt, joissa keogrammiin on piirtynyt revontulivalon jälki. Lisäksi kuvassa on subjektiivisesti arvioituina niiden öiden kuukausimäärä, jolloin revontulet ovat olleet poikkeuksellisen kirkkaita.



Kuva 5.7. Keogrammi Kilpisjärven ASC:n kuvista 7.10.2002. Kuva laaditaan ottamalla perättäisistä revontulikuvista pystyviivoja, jotka liitetään yhteen. Muodostuneen kuvan vaaka-akselille tulee siis aika (UT) ja oikealle pystyakselille revontulien korkeus horisontista siten, että keskellä 0 tarkoittaa taivaanlakea (zeniittiä) ja +90 pohjoista horisonttia ja -90 eteleläistä taivaanrantaa. Vasen pystyakseli ilmoittaa kilometreissä kuinka kaukana havaintoasemasta revontulimuodot sijaitsevat. Kuvassa pystysuorat valosäikeet kertovat sen, että revontulia on esiintynyt lähes koko yön horisontista horisonttiin.

[38] Keogrammin nimi tulee vanhasta eskimokielen sanasta *keo-eeit*, joka tarkoittaa revontulia (PETRIE, 1963).

Kuvaan 5.8 on liitetty myös tiedot auringonpilkkujen ja magneettisen aktiivisuuden (*aa*) vuosiarvoista. Auringonpilkkumaksimi oli vuonna 2000, jolloin revontulien ja magneettisten myrskyjen esiintymismäärät eivät olleet suurimmillaan. Huippulukemat saavutettiin 2003–2004 eli 3–4 -auringonpilkkumaksimin jälkeen, jolloin yleensäkin auringonpilkkujaksojen aikana avaruussäähäiriöt ovat voimakkaimmillaan. Kuvauskaudella 2003–2004 revontulien esiintymismäärät olivat huipussaan ja silloin jopa yli 2/3-osa öistä oli revontulilla valaistuja. Ajanjakson aikana koettiin poikkeuksellisen voimakas avaruussäämyrsky (Halloween-myrsky) 31.10.–3.11.2003. Syksyn 2003 magneettinen häiriöluku (*aa*) oli korkeimmillaan yli 150 vuoteen. Auringonpilkkujakson 23 lopulla 2007–2008 lähellä auringonpilkkujen minimikautta revontuliaktiivisuus väheni, mutta pysyi kuitenkin korkeampana kuin vuonna 1997 noin vuosi edellisen pilkkuminimin jälkeen. Uusi auringonpilkkujakso 24 käynnistyi tammikuussa 2008, mutta vielä vuoden 2009 puolivälissä auringon aktiivisuus ei ole juurikaan noussut minimitasosta.



Kuva 5.8. Harmaat pilarit: Revontuliöiden kuukausimäärä Sodankylässä ASC-kuvien keogrammeista määritettynä.
Mustat pilarit: Voimakkaiden revontulien kuukausimäärät.
Palloviiva: Magneettinen häiriöisyysindeksi (*aa*)
Ympyräviiva: Auringonpilkkuluku.

6 MUITA REVONTULIHAVAINTOJA

CCD-tekniikkaan perustuvia revontulikameroita voidaan käyttää myös TV-moodissa, jolloin kuvauksen nopeus on 25 kuvaa sekunnissa. Suomessa revontulien TV-kuvauksiin on erikoistunut Oulun yliopiston avaruustutkimusryhmä, joka on kehittänyt revontulien TV-kameroita jo 1990-luvulta alkaen (KAILA, 1998). Tavalliseen AS-kameraan verrattuna TV-kuvauksissa on se etu, että aikaresoluutio on hyvä, jolloin se sopii erinomaisesti nopeasti vaihtelevien ja sykkivien revontulien kuvaamiseen erilaisten lähiavaruuden tutkimuskampanjojen aikana yhdessä muiden avaruus-sääinstrumenttien kanssa. Lisäksi kuvaa voidaan seurata samanaikaisesti monitorilta sisätiloissa. Oulun yliopiston revontulikameroita on ollut käytössä mm. Sodan-kylän observatoriossa ja Kilpisjärven asemalla yhdessä Ilmatieteen laitoksen laittei-den kanssa.



Kuva 6.1. Oulun yliopistossa kehitetty revontulien kuvaukseen käytetty CCD-tekniikkaan perustuva TV-kamera (www.spaceweb.oulu.fi).

Kuvassa 6.1 on Oulun yliopiston avaruustutkimusryhmän kehittämä revontulikamera ATV-98, joka valmistui vuonna 1998.

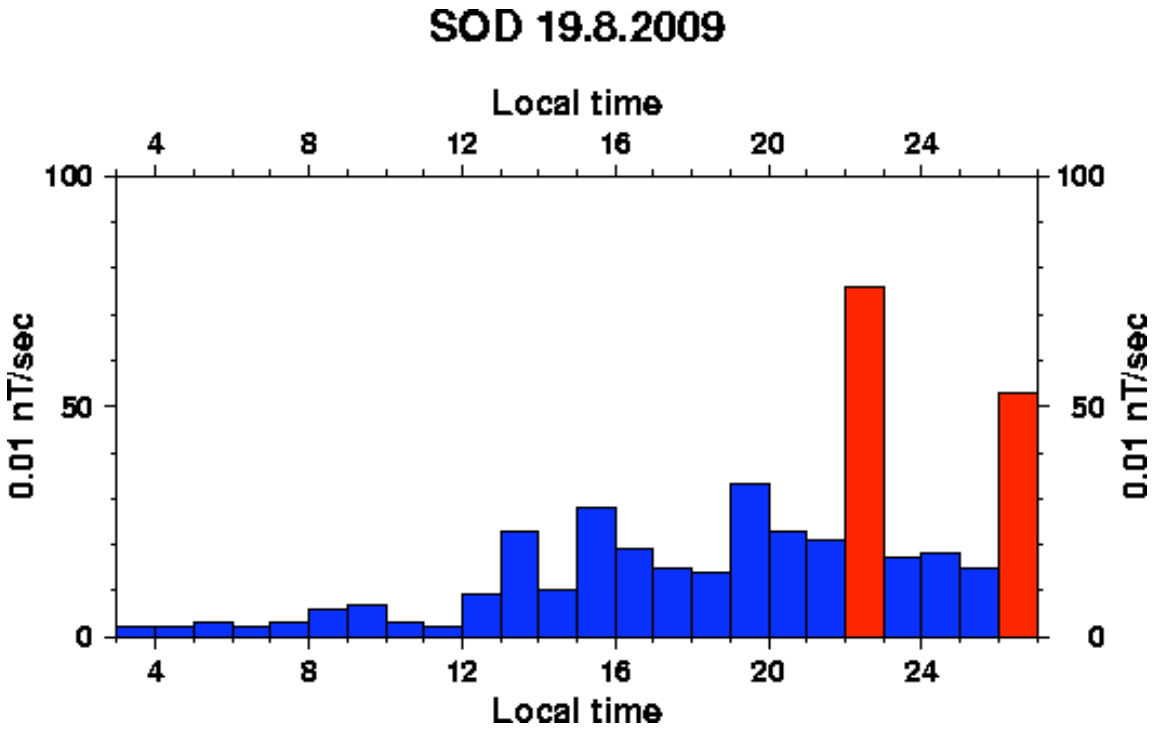
Revontulitelevisiokameroiden lisäksi Oulun yliopistolla on revontulimittauksia varten fotometrilaitteita, joilla voidaan mitata revontulivalon voimakkuutta tietyillä kapeilla aallonpituusalueilla. Fotometriä voidaan myös kääntää eri korkeuskulmille missä revontulia esiintyy. Mittauksia on tehty myös revontulien spektreistä (JUSSILA et al., 2003). Havaintopaikkoja on Sodankylän lisäksi ollut mm. Kilpisjärvellä, Tromsassa ja Kiirunassa.

Suuren yleisön revontulien seurantaa palvelee Ilmatieteen laitoksen revontulihälytin. Se perustuu siihen, että äkilliset muutokset maapallon magneettikentässä kertovat suuremman avaruussäämyrskyn revontulineen ja magneettikentän häiriöineen käynnistyneen. Kun magneettikentän havainnot osoittavat tietyn kynnysarvon ylitty-neen (Kuva 6.2), automaattinen viesti lähtee sähköpostiin, joka ilmoittaa avaruus-säätilan muutoksesta. Viestin vastaanottaja tietää silloin, että esimerkiksi revontulia on todennäköisesti odotettavissa saman päivän iltana pimeänä vuoden-aikana. Ilmatieteen laitoksen ylläpitämään www-palveluun Auroras Now! (http:// aurora. fmi.fi) kuuluu magneettikenttähälyttimet Pohjois- ja Etelä-Suomelle erikseen ja Pohjois-Suomen revontulia tarkkailevat revontulikamerat useilla Lapin asemilla. Auroras Now! on tuotettu alunperin Euroopan avaruusjärjestön (ESA) avaruussääpalveluja kehittävässä pilottihankkeessa.

Ilmatieteen laitoksen nykyisessä organisaatiossa (2008) avaruussäähän liittyvää tutkimusta tehdään Arktisen tutkimuksen (ARK) ja Uusien havaintomenetelmien (UHA) yksiköissä. ARK:in toiminta keskittyy eritoten Maan ionosfäärin avaruussääilmiöiden ja niihin kiinteästi liittyvän geomagneettisen induktion tutkimukseen. UHA:lla tutkitaan maa-aurinkosysteemin ja aurinkokunnan eri planeettojen plasmaympäristöä tietokonesimulaatioiden avulla. ARKin ja UHA:n tutkimushankkeet ovat tyypillisesti aina toisiinsa kytkeytyneitä ja hyödyntävät sekä satelliiteilla että maanpinnalla kerättyä havaintoaineistoa. Sekä revontulikameroiden että magnetometrien tekninen ylläpito kuuluu Sää- ja turvallisuus -tulosalueen Havaintopalvelut (HAV) yksikön vastuulle.

Ajankohtaisia avaruussäätietoja ja -uutisia on internetissä saatavilla runsaasti. Ne ovat yleensä englanniksi. Suuret avaruusorganisaatiot kuten esimerkiksi NASA ja Euroopan avaruusjärjestö (ESA) tarjoavat internetsivuillaan monenlaista tietoa avaruusaiheista ja reaaliaikaisia havaintotuloksia avaruussäätilasta ja revontulista. Eräs suosituimmista sivuista on www.spaceweather.com, josta saa monipuolisen kuvauksen meneillään olevasta avaruussäätilasta ja auringon aktiivisuudesta sekä satelliittikuvia auringosta.

Revontulikuvia (Kuva 6.3) ja niiden aihepiiriä valaisevia oheistekstejä on julkaistu monissa suurelle yleisölle tarkoitetuissa revontulikirjoissa (KAILA, 1998; RIKKONEN ja TURUNEN, 2000; JUSSILA, 2002; TURUNEN ja MANNINEN, 2004). Näistä osa on käännetty myös useille kielille kansainväliseen jakeluun. Suomalaisten tutkijoiden revontulikuvia on käytetty myös postimerkkien aiheina.



Kuva 6.2. Ilmatieteen laitoksen Auroras Now! www-sivuilla näkyvä magneettikenttähälytin. Punaisella merkityt palkit kertovat, milloin avaruussäätilan magneettikentän aikamuutos on ylittänyt myrskyrajan. Palkit päivittyvät automaattisesti tunnin välein. Tiedot perustuvat Nurmijärven (NUR) ja Sodankylän (SOD) observatorioiden ja Kevon (KEV) automaattiaseman rekisteröinteihin. Kuvan tapauksessa Sodankylässä oli 19.8.2009 lyhytaikainen magneettikentän myrsky illalla kello 22 ja puolenyön jälkeen kello 02.



Kuva 6.3. Punaisia revontulia vihertävien säteettäisten muotojen yllä. (Kuva: Jouni Jussila).

7 YHTEENVETO

Ensimmäiset systemaattiset merkinnät revontulista tehtiin Turun Akatemiassa 1700-luvun puolivälissä osana säännöllisiä meteorologisia havaintoja. Aloitteentekijä oli kuuluisa ruotsalainen tähtitieteen, meteorologian, revontulien ja geomagnetismin tutkija Anders Celsius (1701–1744). Alussa vain Turussa ja Helsingissä kerätyt tiedot revontulien esiintymisöistä laajenivat myöhemmin 1800-luvun loppupuolella koko maata kattaviksi osana synoptista meteorologista havaintotoimintaa. Ensimmäisen Lappiin asti ulottuvan meteorologisen ja fenologisen havaintoverkon organisoi Suomen Tiedeseura 1846–1856. Vuodesta 1881 lähtien revontulia havaittiin synoptisten säähavaintojen yhteydessä vuoteen 1964 saakka. Kaikkiaan visuaalisia revon-

tulihavaintoja on kirjattu useita tuhansia. Revontuliaikasarja on melko epähomogeeninen, koska havaintopaikkojen lukumäärä ja havaintokriteeriot ovat vaihdelleet paljon eri aikoina. Havainnoista voidaan kuitenkin luotettavasti erottaa revontulien esiintymisien lyhytaikaisia jaksollisuuksia, jotka liittyvät auringon pyörähdysaikaan (27 vrk), vuodenaikaisvaihteluja sekä auringonpilkkujakson mukaisia jaksollisuuksia. Revontulien esiintymisen vuodesta toiseen tapahtuva vaihtelu seuraa hyvin auringon aktiivisuutta (geomagneettisilla häiriöillä mitattuna) ja pilkkujen määriä.

1800-luvun alun niukat revontulihavainnot liittyvät auringon vähäaktiiviseen ja vähäpilkkuiseen kauteen. joka tunnetaan nimellä Daltonin minimi (1795–1825). Revontulien määrässä tapahtui systemaattinen kasvu noin kolminkertaiseksi 1900-luvun alusta 1960-luvulle saakka. Kyseessä oli auringon yleisen aktiivisuustason noususta, joka näkyi myös revontulista riippumattomista auringon aktiivisuutta kuvaavissa tunnusluvuissa (auringonpilkut, geomagneettinen häiriöisyys).

Visuaalisiin havaintoihin perustuva revontulien ja auringonpilkkujen määrien välinen korrelaatio auringonpilkkujaksojen aikana on jossain määrin ristiriitainen revontulikuvista (All-Sky kamerat) johdettujen esiintymistilastojen kanssa. Niiden mukaan revontuliaktiivisuus vuodesta toiseen ei juuri vähene auringonpilkkujen minimivuosinakaan. Tilastojen mukaan revontulien esiintymistodennäköisyys Lapissa on noin 40 % geomagneettisesti kaikkein rauhallisimpina kausinakin. Aktiivisina aikoina todennäköisyys nousee yli 80 %:iin. Revontulikamerat rekisteröivät pimeänä aikana läpi koko yön, mutta visuaaliset havainnot tehdään vain tiettyinä havaintoaikana. Näin kamerat taltioivat enemmän myös heikkovaloisia revontulia kuin silmähavainnoilla on mahdollista. Revontulikuvista määritetty revontulien esiintymisindeksi seuraa vuositasolla satelliittimittauksista johdettua aurinkotuulen sähkökenttää, joka säätelee revontulia synnyttäviä magnetosfäärin plasmaprosesseja.

I ja II Polaarivuosi, Geofysiikan vuosi 1957–1958 ja monet myöhemmät kansainväliset laajat tutkimusohjelmat ovat suuresti aktivoineet suomalaista geofysiikan tutkimusta ja havaintotoimintaa. Säännölliset revontulikuvaukset käynnistettiin Geofysiikan vuonna 1957. Ilmatieteen laitoksella on ollut filmille kuvaavia revontulimlaitteita kolmessa eri kuvausteknologisessa sukupolvessa noin 40 vuoden ajan.

Nykyiset digitaaliset CCD-kamerajärjestelmät ovat olleet käytössä yli 10 vuotta ja niissäkin on jo toinen kameramallisto käytössä. Digitaalisten kuvausjärjestelmät ovat mahdollistaneet myös revontulikuvien automaattiset analysoinnit tietokonepohjaisilla kuvankäsittelyohjelmilla.

Kuvauspaikat ovat olleet pääasiassa Lapissa, mutta laitteita on ollut tilapäisesti myös Huippuvuorilla ja Etelämantereella. Suomessa Ilmatieteen laitos, Oulun yliopisto ja Sodankylän geofysiikan observatorio ovat ylläpitäneet erilaisia revontulikuvauslaitteita ja ne muodostavat nykyään olennaisen osan avaruussään monitoroinnista lähiavaruuden tutkimuksessa.

Kiitosmaininta: Kirsti Kauristie ja Mikko Syrjäsuo (Ilmatieteen laitos) ovat tehneet tähän raporttiin lukuisia arvokkaita muutosehdotuksia, jotka ovat parantaneet esityksen sisältöä.

KIRJALLISUUSVIITTEET

AKASOFU, S.-I., 1968. Polar and magnetospheric substorms. D. Reidel, 280 s.

AKASOFU, S.-I., CHAPMAN, S. and MEINEL, A.B., 1966. The Aurora. Teoksessa: Encyclopedia of Physics (Ed. S. Flügge), Vol. XLIX/1, Springer, New York, p. 1-158.

AMM, O. et al., 2005. Coordinated studies of the geospace environment using Cluster, satellite and ground-based data: An interim report. *Ann. Geophys.*, **23**, 2129-2170.

ANGERVO, J.M., 1948. Sääopin perusteet, WSOY, 457 s.

ANGOT, A., 1897. The Aurora Borealis. Appleton Comp., New York.

ARGELANDER F. W. A. 1867: Verzeichniss von Nordlichtern beobachtet auf den Sternwarten zu Åbo und Helsingfors in den Jahren 1823-1837. *Acta Soc. Scient. Fenn.* **8**, 101-149.

ARRHENIUS, S., 1903. Lehrbuch der kosmischen Physik II. Hirzel, Leipzig, 472 s.

BREKKE, A. and EGELAND, A., 1994. The northern lights. Grœndahl & Dreyer, Oslo.

CELSIUS, A., 1740. Anmärkningar öfver magnetnålens stundeliga förändningar uti des misvisning. *Kungl. Svensk. Vetenskaps. Acad. Handl.*, **2**, 296-299.

CHAPMAN, S., 1957. Visual auroral observations. *Ann. International Geophys. Year,* IV, 41-103.

CHAPMAN, S. and BARTELS, J., 1940. Geomagnetism, Vol. I & II. Oxford, Clarendon Press.

CHAPMAN, S. and FERRARO, V.C., 1931. A new theory of magnetic storms. *Terr. Magn. Atm. El.*, 36, 77-97.

DALLOLMO, D., 1980. Latin terminology relating to aurorae, comets, meteoris and novae. *J. Hist. Astron.*, **11**.

De MAIRAN, J.-J., 1733. Traite physique et historique de l'Aurore Boréale. Suite des Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, Paris, p. 259-263.

DONOVAN, E.F., TRONDSEN, T.S., COGGER, L.L. and JACKEL, B.J., 2003. All-Sky imaging within the Canadian CANOPUS and NORTSAR projects. Sodankylä *Geophys. Obs. Publ.*, **92**, 109-112.

EATHER, R.E., 1980. Majestic Lights - The Aurora in science, history and arts,

AGU, Washington, 323 p.

EDDY, J.A., 1976. The Maunder Minimum. *Science*, **192**, 1189-1202.

EKLÖF, J.H., 1847. Norrskenets årliga periodicitet. *Acta Soc. Scient. Fenn.* **2**, 299-316.

FELLMAN, J., 1874. Förteckningar öfver norrsken. *Finska Vetenskaps-Societetens Förhandl.*, **XVI**, 48-51.

FRITZ, H., 1873. Verzeichniss beobachteter Polarlichter, C. Gerold, Wien, 255 p.

FRÖHLICH, C. and LEAN, J., 2004, Solar radiative output and its variability: evidence and mechanisms. *Astron. and Astrophys. Rev.*, **12**, 273-320, doi: 10.1007/s00159-004-0024-1

GOOLD, G.P. (Ed.), 1987. Aristotle - VII Meteorologica. Thomson Litho, 431 p.

GREENWALD, R.A., WEISS, W., NIELSEN, E. and THOMAS, N.R., 1978. STARE: A new radar auroral backscatter experiment in Northern Scandinavia. *Radio Sci.*, **12**, 1021-1039.

GÜNTHER, S., 1885. Lehrbuch der physikalischen Geographie - II. Band. Enke Verlag, Stuttgart, 670 s.

HAAVIO, M. 1944. Kansanomaisia käsityksiä revontulista. Suomalainen Tiedeaka temia - Esitelmät ja pöytäkirjat 1943, 170-192.

HALLEY, E., 1719. An account of the phenomena of a very extraordinary aurora borealis. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, **30**, 1099-1110.

HOLMBERG, P., 1989. Karl Selim Lemström - fysiker, norrskenforskare och professor. *Opusculum* **2-3**, 67-140.

HOLMBERG, P., 1992. The history of physics in Finland 1828-1918. *Societas Scientarium Fennica,* Helsinki, 267 p.

HOLOPAINEN, J., 2004. Turun varhainen ilmastollinen havaintosarja. *Ilmatieteen laitos, Raportteja* 8/2004, 59 s.

HOLOPAINEN, J. 2006. Reconstructions of past climates from documentary and natural sources in Finland since the 18th century. Univ. of Helsinki, Publ. Dept. of Geology, D9.

HOLOPAINEN, J. and VESAJOKI, H., 2000. Varhainen lämpötilahavaintosarja Torniosta vuosilta 1737–1749. *Terra*, **113**, 196-201.

HUOVINEN, V., 1961. Havukka-ahon ajattelija. WSOY, Porvoo.

HÄKKINEN, L., PULKKINEN, T., NEVANLINNA, H., PIRJOLA, R. and TANSKANEN, E.,

2002. Effect of induced currents on *Dst* and on magnetic variations at midlatitude stations, *J. Geophys. Res.* **107**, doi:10.1029/2001JA900130.

HÄLLSTRÖM, G.G., 1847. De apparitionibus aurorae borealis in septentrionalibus Europae partibus [Revontulien näkyvyydestä Euroopan pohjoisosassa]. *Acta Soc. Scient. Fenn.* **2**, 363-376.

HYPPÖNEN, M., PELLINEN, R., SUCKSDORFF, C. and TORNIAINEN, R., 1974. Digital all-sky camera. *Finn. Met. Inst. - Tech. Report* No. 9.

JOHANSSON, O.V., 1911. Aus G.G. Hällströms hinterlassenen Papieren. *Bidrag Kännedom Finlands Natur o. Folk.*, **72**, 1-119.

JUSSILA, J., 2002. Aurora - Revontulien taivaallinen näytelmä, WSOY, 128 s.

JUSSILA, J.R.T., HOLMA, H. and KAILA, K.U., 2003. Optical auroral instrumentation of University of Oulu. *Sodankylä Geophys. Obs. Publ.*, 92, 81-84.

KAILA, K., 1981. Three-dimensional mapping of the aurora from digitized all-sky picture. *Finn. Met. Inst. - Tech. Rep.*, 25.

KAILA, K., 1998. Revontulet - kansankäsityksistä tutkimukseen. URSAn julk., 65, 300 s.

KATAJA, E., 1973. The Sodankylä geophysical observatory in 1973. *Veröff. geophys. Obs. finn. Akad. Wiss.*, **56**, 27-72.

KLINGE, M., 1990. Professoreita. Otava, Keuruu, 238 p.

KOIVISTO, M. (toim.), 2004. Jääkaudet, WSOY, 233 s.

KRUEGER, A., 1872. Om antalet af norrsken under de sednast förflutna åren. *Finska Vetenskaps-Societetens Förhandl.*, **XIV**, 23.

LAINE U. K., TURUNEN E., MANNINEN J. & NEVANLINNA H., 2001. Revontuliäänet, havaintoja ja mittauksia. XX Geofysiikan päivät 15.-16.5.2001, Helsinki, ss. 101-106.

LEGRAND, J. and SIMON, P.A., 1987. Two hundred years of auroral activity (1780-1979). *Ann. Geophys.*, **5**, 161-168.

LEMSTRÖM, S., 1883. Om finska polarstationen. *Öfversigt Finska Vetenskaps-Soc. Förhandl.*, **26**, 40-49.

LEMSTRÖM, S., 1886. L'aurore Boreale, Gauthier-Villars, Paris, 199 p.

LEMSTRÖM, S. et BIESE, E., 1886-1898. Exploration internationale des régions polaires 1882-1883 et1883-1884. Observations faites aux stations de Sodankylä et de Kultala, Tome I-III.

LOCKWOOD, M., 2003. Twenty-three cycles of changing open solar magnetic flux. *J. Geophys. Res.*, **108**, doi:10.1029/2002JA009431.

LOOMIS, E., 1860. On the geographical distribution of auroras in the northern hemisphere. *Amer. J. Sci. and Arts.*, **30**, 89-94.

MALIN, S.R.C. and BARRACLOUGH, D.R., 1991. Humboldt and the Earth's magnetic field. *Quarterly J. Roy. Astron. Soc.* **32**, 279-293.

MENVIELLE, M. and BERTHELIER, A., 1991. The *K*-derived planetary indices: Description and availability. *Rev. Geophys.*, **29**, 413-432.

MOBERG, A., 1860. Klimatologiska iaktagelser i Finland år 1846-1855. I. Naturalhistoriska anteckningar. *Bidrag Kännedom Finlands Natur o. Folk*, **7**.

MUSCHELER, R. et al., 2005. How unusual is today's solar activity? *Nature*, **436**, E3-E4.

NEVANLINNA, H., 1995. Auroral observations in Finland - Visual sightings during the 18th and 19th centuries. *J. Geomag. Geoelectr.*, **47**, 953-960

NEVANLINNA, H., 1998b. Magnetic results, Sodankylä Polar Year Observatory 1882-1883. *Sodankylä Geophys. Obs. Publ.*, **84**.

NEVANLINNA, H., 1999. Geomagnetic observations at Sodankylä during the first international polar year (1882-1883). *Geophysica*, **35** 15-22.

NEVANLINNA, H., 2000. Revontulet - tarua ja totta. *Ilmatieteen laitos, Geofys. julk.*, **43**, 25 s.

NEVANLINNA, H., KULTIMA, J. ja KAJANDER, J., 2003. Anders Hellant (1717–1789) - tähtitieteen ja geofysiikan tutkija Torniossa. *XXI Geofysiikan päivät*, 121-126.

NEVANLINNA, H., 2004a. Results of the Helsinki magnetic observatory 1844-1912. *Ann. Geophys.*, **22**, 1691-1704.

NEVANLINNA, H., 2004b. Historical space climate data from Finland: Compilation and analysis. *Sol. Phys.*, **224**, 395-405.

NEVANLINNA, H., 2005. Revontulet - taivaallinen valonäytelmä. *Duodecim*, **120**, 25-31.

NEVANLINNA, H., 2006. Avaruussää - Auringosta tuulee. *URSAn julkaisuja* **102**, 132 s.

NEVANLINNA, H., 2009a. Geomagnetismin ABC-kirja. Ilmatieteen laitos - Raportteja, 2009/1, 204 s.

NEVANLINNA, H., 2009b. Avaruussään geomagneettiset vaihtelut. Teoksessa: Maan

ytimestä avaruuteen (toim. I. Haapala ja T. Pulkkinen), *Bidrag Kännedom Finlands Natur o. Folk*, **180**, 187-196.

NEVANLINNA, H. and PULKKINEN, T.I., 1998. Solar cycle correlations of substorm and auroral occurrence frequency. *Geophys. Res. Lett.,* **25**, 3087-3090.

NEVANLINNA, H. and PULKKINEN, T.I., 2001. Auroral observations in Finland: Results from all-sky cameras, 1973-1997. *J. Geophys. Res.*, **106**, 8109-8118.

NYGRÉN, T. and SILÉN, J., 1982. A.E.Nordenskiöld and the auroral oval. *Trans. Amer. Geophys. Soc. EOS*, **63**, 553-555.

PELLINEN, R.J., 1979. Induction model and observations of onset of magnetospheric substorms. *Univ. Helsinki, Dept. Geophys., Rep.Ser.*, **12**.

PELLINEN, R.J. and HEIKKILA, W.J., 1979. Observations of auroral fading before breakup. *J. Geophys. Res.*, **83**, 4207-4218.

PETRIE, W., 1963. KEOEEIT - The story of the Aurora Borealis. Pergamon, 134 p..

PULKKINEN, T.I., NEVANLINNA, H., PULKKINEN, P.J. and LOCKWOOD, M., 2001. The Sun-Earth connection in time scales from years to decades and centuries. *Space Sci. Rev.*, **95**, 625-637.

ROUILLARD, A. P., LOCKWOOD, M. and FINCH, I., 2007. Centennial changes in the solar wind speed and in the open solar flux, *J. Geophys. Res.*, **112**, A05103, doi:10.1029/2006JA012130.

RUBENSON, R., 1879. Catalogue des aurores bréales observées en Suéde. *Kgl. Sv. Vetenskaps Akad. Handl.*, **15**.

RUBENSON, R., 1882. Catalogue des aurores boréales observées en Suéde. *Kgl. Sv. Vetenskaps Akad. Handl.*, **18**.

RUSSELL, C.T. and MCPHERRON, R.L., 1973. Semiannual variation of geomagnetic Activity. *J. Geophys. Res.*, **78**, 92-108.

RUSSELL, C.T. and SOUTHWOOD, D.J. (Eds.), 1982. The IMS source book. American Geophysical Union, 294 p.

SCHRÖDER, W., 1984. Das Phänomen des Polarlichts. Wiss. Buchgesellschaft Darmstadt, 156 s.

SCHYBERGSON, V. (toim.), 1998. Totuuden nimessä: Kaksitoista merkittävää Suomen Tiedeseuran jäsentä. Suomen Tiedeseura, Vuosikirja 1998, 200 s.

SEPPINEN, I., 1988. Ilmatieteen laitos 1838-1988. Ilmatieteen laitos, Helsinki, 290 p.

SEPPINEN, I., 2004. Suomalaisen avaruustutkimuksen historia. Yliopistopaino, 366 s.

SEPPINEN, I., 2006. Selim Lemström. Yliopistopaino, 145 s.

SILVERMAN, S.M. and TUAN, T.F., 1973. Auroral audibility. *Adv. Geophys.*, **16**, 155-266.

SIMOJOKI H., 1978. The history of geophysics in Finland 1828-1918. *Societas Scientarium Fennica*, Helsinki, 157 p.

STOFFREGEN, W., 1955. All-sky camera auroral research during the third geophysical year 1957-1958, *Tellus*, **7**, 509-517.

STÖRMER, K., 1932. Progress in the photography of the aurora borealis. *Terr. Magn. Atmos. Electr.*, **37**, 475-480.

STÖRMER, K., 1955. The polar aurora. Oxford, Clarendon Press, 403 p.

SUCKSDORFF, C. et al., 2001. Geophysics in Finland in the Twentieth Century. *Geophysica*, **37**, 309-355.

SYRJÄSUO, M., 2001a. FMI all-sky camera network. *Finn. Met. Inst. - Geophys. Publ.,* **52**.

SYRJÄSUO, M., 2001b. Auroral monitoring network: From all-sky camera system to automated image analysis. *Finn. Met. Inst. - Contributions*, **32**, 95 p.

SYRJÄSUO, M. and DONOVAN, E.F., 2002. Analysis of auroral images: Detection and tracking. *Geophysica*, **38**, 3-14.

SYRJÄSUO, M. and DONOVAN, E.F., 2004. Diurnal auroral occurrence statistics obtained via machine vision. *Ann. Geophys.*, **22**, 1103-1113.

TROMHOLT, S., 1902. Katalog der in Norwegen bis Juni 1878 beobachteten Nordlichter. Bybwad, Oslo, 422 p.

URPILAINEN, E., 2001. Hyödyn ja uushumanismin kausi. Teoksessa "Suomen tieteen historia" I, 170-273.

VESTINE, E.H., 1944. The geographic incidence of aurora and geomagnetic disturbance, northern hemisphere. *Terr. Magn. Atm. Electr.*, **49**, 77-102.

VESTINE, E.H. and SNYDER, E.J., 1945. The geographic incidence of aurora and magnetic disturbance. *Terr. Magn. Atm. Electr.*, **50**, 105-124.

WILSON, C.R., 1967. Infrasonic pressure waves from the aurora: A shock wave model. *Nature*, 216, 131-133.

RAPORTTEJA — RAPPORTER — REPORTS

1986: 1. Savolainen, Anna Liisa et al., 1986. Radioaktiivisten aineiden kulkeutuminen Tshernobylin ydinvoimalaonnettomuuden aikana. Väliaikainen raportti. 39 s.

2. Savolainen, Anna Liisa et al., 1986. Dispersion of radioactive release following the Chernobyl nuclear power plant accident. Interim report. 44 p.

3. Ahti, Kari, 1986. Rakennussääpalvelukokeilu 1985-1986. Väliraportti Helsingin ympäristön talvikokeilusta 18.11.-13.3.1986. 26 s.

4. Korhonen, Ossi, 1986. Pintatuulen vertailumittauksia lentoasemilla. 38 s.

1987: 1. Karppinen, Ari et al., 1987. Description and application of a system for calculating radiation doses due to long range transport of radioactive releases. 50 p.

2. Venäläinen, Ari, 1987. Ilmastohavaintoihin perustuva arvio jyrsinturpeen tuotantoedellytyksistä Suomessa. 35 s.

3. Kukkonen, Jaakko ja Savolainen, Anna Liisa, 1987. Myrkyllisten kaasujen päästöt ja leviäminen onnettomuustilanteissa. 172 s.

4. Nordlund, Göran ja Rantakrans, Erkki, 1987. Matemaattisfysikaalisten ilmanlaadun arviointimallien luotettavuus. 29 s.

5. Ahti, Kari, 1987. Rakennussäätutkimuksen loppuraportti. 45 s.

6. Hakola, Hannele et al., 1987. Otsonin vaihteluista Suomessa yhden vuoden havaintoaineiston valossa. 64 s.

7. Tammelin, Bengt ja Erkiö, Eero, 1987. Energialaskennan säätiedot – suomalainen testivuosi. 108 s.

1988: 1. Eerola, Kalle, 1988. Havaintojen merkityksestä numeerisessa säänennustuksessa. 36 s.

2. Fredrikson, Liisa, 1988. Tunturisääprojekti 1986-1987. Loppuraportti. 31 s.

3. Salmi, Timo and Joffre, Sylvain, 1988. Airborne pollutant measurements over the Baltic Sea: meteorological interpretation. 55 p.

4. Hongisto, Marke, Wallin, Markku ja Kaila, Juhani, 1988. Rikkipäästöjen vähentämistoimenpiteiden taloudellisesti tehokas valinta. 80 s.

5. Elomaa, Esko et al., 1988. Ilmatieteen laitoksen automaattisten merisääasemien käyttövarmuuden parantaminen. 55 s.

6. Venäläinen, Ari ja Nordlund, Anneli, 1988. Kasvukauden ilmastotiedotteen sisältö ja käyttö. 63 s.

7. Nieminen, Rauno, 1988. Numeeristen paine- ja ja korkeuskenttäennusteiden objektiivinen verifiointisysteemi sekä sen antamia tuloksia vuosilta 1985 ja 1986. 35 s.

1989: 1. Ilvessalo, Pekko, 1989. Yksittäisestä piipusta ilmaan pääsevien epäpuhtauksien suurimpien tuntipitoisuuksien arviointimenetelmä. 21 s.

1992: 1. Mhita, M.S. and Venäläinen, Ari, 1991. The variability of rainfall in Tanzania. 32 p.

2. Anttila, Pia (toim.), 1992. Rikki- ja typpilaskeuman kehitys Suomessa 1980-1990. 28 s.

1993: 1. Hongisto, Marke ja Valtanen Kalevi, 1993. Rikin ja typen yhdisteiden kaukokulkeutumismallin kehittäminen HIRLAM-sääennustemallin yhteyteen. 49 s.

2. Karlsson, Vuokko, 1993. Kansalliset rikkidioksidin analyysivertailut 1979 - 1991. 27 s.

1994: 1. Komulainen, Marja-Leena, 1995. Myrsky Itämerellä 28.9.1994. Säätilan kehitys Pohjois-Itämerellä M/S Estonian onnettomuusyönä. 42 s.

2. Komulainen, Marja-Leena, 1995. The Baltic Sea Storm on 28.9.1994. An investigation into the weather situation which developed in the northern Baltic at the time of the accident to m/s Estonia. 42 p.

1995: 1. Aurela, Mika, 1995. Mikrometeorologiset vuomittausmenetelmät - sovelluksena otsonin mittaaminen suoralla menetelmällä. 88 s.

2. Valkonen, Esko, Mäkelä, Kari ja Rantakrans, Erkki, 1995. Liikenteen päästöjen leviäminen katukuilussa - AIG-mallin soveltuvuus maamme oloihin. 25 s.

3. Virkkula, Aki, Lättilä, Heikki ja Koskinen, Timo, 1995. Otsonin maanpintapitoisuuden mittaaminen UV-säteilyn absorbtiolla: DOAS-menetelmän vertailu suljettua näytteenottotilaa käyttävään menetelmään. 29 s.

4. Bremer, Pia, Ilvessalo, Pekko, Pohjola, Veijo, Saari, Helena ja Valtanen, Kalevi, 1995. Ilmanlaatuennusteiden ja -indeksin kehittäminen Helsingin Käpylässä suoritettujen mittausten perusteella. 81 s.

1996: 1. Saari, Helena, Salmi, Timo ja Kartastenpää, Raimo, 1996. Taajamien ilmanlaatu suhteessa uusiin ohjearvoihin. 98 s.

1997: 1. Solantie, Reijo, 1997. Keväthallojen alueellisista piirteistä ja vähän talvipakkastenkin. 28 s.

1998: 1 Paatero, Jussi, Hatakka, Juha and Viisanen, Yrjö, 1998. Concurrent measurements of airborne radon-222, lead-210 and beryllium-7 at the Pallas-Sodankylä GAW station, Northern Finland. 26 p.

2 Venäläinen, Ari ja Helminen, Jaakko, 1998. Maanteiden talvikunnossapidon sääindeksi. 47 s.

3 Kallio, Esa, Koskinen, Hannu ja Mälkki, Anssi, 1998. VII Suomen avaruustutkijoiden COSPAR-kokous, Tiivistelmät. 40 s.

4 Koskinen, H. and Pulkkinen, T., 1998. State of the art of space weather modelling and proposed ESA strategy. 66 p.

5 Venäläinen, Ari ja Tuomenvirta Heikki, 1998. Arvio ilmaston lämpenemisen vaikutuksesta teiden talvikunnossapidon kustannuksiin. 19 s.

1999: 1 Mälkki, Anssi, 1999. Near earth electron environment modelling tool user/software requirements document. 43 p.

2 Pulkkinen, Antti, 1999. Geomagneettisesti indusoituvat virrat Suomen maakaasuverkostossa. 46 s.

3 Venäläinen, Ari, 1999. Talven lämpötilan ja maanteiden suolauksen välinen riippuvuus Suomessa.16 s.

4 Koskinen, H., Eliasson, L., Holback, B., Andersson, L., Eriksson, A., Mälkki, A., Nordberg, O., Pulkkinen, T., Viljanen, A., Wahlund, J.-E., Wu, J.-G., 1999. Space weather and interactions with scacecraft : spee final report. 191 p.

2000: 1 Solantie, Reijo ja Drebs, Achim, 2000. Kauden 1961 - 1990 lämpöoloista kasvukautena alustan vaikutus huomioiden, 38 s.

2 Pulkkinen, Antti, Viljanen, Ari, Pirjola, Risto, and Bear working group, 2000. Large geomagnetically induced currents in the Finnish high-voltage power system. 99 p.

3 Solantie, R. ja Uusitalo, K., 2000. Patoturvallisuuden mitoitussadannat: Suomen suurimpien 1, 5 ja 14 vrk:n piste- ja aluesadantojen analysointi vuodet 1959 - 1998 kattavasta aineistosta. 77 s.

4 Tuomenvirta, Heikki, Uusitalo, Kimmo, Vehviläinen, Bertel, Carter, Timothy, 2000. Ilmastonmuutos, mitoitussadanta ja patoturvallisuus: arvio sadannan ja sen ääriarvojen sekä lämpötilan muutoksista Suomessa vuoteen 2100. 65 s.

5 Viljanen, Ari, Pirjola, Risto and Tuomi, Tapio, 2000. Abstracts of the URSI XXV national convention on radio science. 108 p.

6 Solantie, Reijo ja Drebs, Achim, 2000. Keskimääräinen vuoden ylin ja alin lämpötila Suomessa 1961 - 90. 31 s.

7 Korhonen, Kimmo, 2000. Geomagneettiset mallit ja IGRF-appletti. 85 s.

2001: 1 Koskinen, H., Tanskanen, E., Pirjola, R., Pulkkinen, A., Dyer, C., Rodgers, D., Cannon, P., Mandeville, J.-C. and Boscher, D., 2001. Space weather effects catalogue. 41 p.

2 Koskinen, H., Tanskanen, E., Pirjola, R., Pulkkinen, A., Dyer, C., Rodgers, D., Cannon, P., Mandeville, J.-C. and Boscher, D., 2001. Rationale for a european space weather programme. 53 p.

3 Paatero, J., Valkama, I., Makkonen, U., Laurén, M., Salminen, K., Raittila, J. and Viisanen, Y., 2001. Inorganic components of the ground-level air and meteorological parameters at Hyytiälä, Finland during the BIOFOR project 1998-1999. 48 p.

4 Solantie, Reijo, Drebs, Achim, 2001. Maps of daily and monthly minimum temperatures in Finland for June, July, and August 1961-1990, considering the effect of the underlying surface. 28 p.

5 Sahlgren, Vesa, 2001. Tuulikentän alueellisesta vaihtelusta Längelmävesi-Roine -järvialueella. 33 s.

6 Tammelin, Bengt, Heimo, Alain, Leroy, Michel, Rast, Jacques and Säntti, Kristiina, 2001. Meteorological measurements under icing conditions : EUMETNET SWS II project. 52 p.

2002: 1 Solantie, Reijo, Drebs, Achim, Kaukoranta, Juho-Pekka, 2002. Lämpötiloja eri vuodenaikoina ja eri maastotyypeissä Alajärven Möksyssä. 57 s.

2. Tammelin, Bengt, Forsius, John, Jylhä, Kirsti, Järvinen, Pekka, Koskela, Jaakko, Tuomenvirta, Heikki, Turunen, Merja A., Vehviläinen, Bertel, Venäläinen, Ari, 2002. Ilmastonmuutoksen vaikutuksia energiantuotantoon ja lämmitysenergian tarpeeseen. 121 s.

2003: 1. Vajda, Andrea and Venäläinen, Ari, 2003. Small-scale spatial variation of climate in northern Finland. 34 p.

2. Solantie, Reijo, 2003. On definition of ecoclimatic zones in Finland. 44 p.

3. Pulkkinen, T.I., 2003. Chapman conference on physics and modelling of the inner magnetosphere Helsinki, Finland, August 25 -29, 2003. Book of abstracts. 110 p.

4. Pulkkinen, T. I., 2003. Chapman conference on physics and modelling of the inner magnetosphere Helsinki, Finland, August 25 -29, 2003. Conference program. 16 p.

5. Merikallio, Sini, 2003. Available solar energy on the dusty Martian atmosphere and surface. 84 p.

6. Solantie, Reijo, 2003. Regular diurnal temperature variation in the Southern and Middle boreal zones in Finland in relation to the production of sensible heat. 63 p.

2004: 1. Solantie, Reijo, Drebs, Achim and Kaukoranta, Juho-Pekka, 2004. Regular diurnal temperature variation in various landtypes in the Möksy experimental field in summer 2002, in relation to the production of sensible heat. 69 p.

2. Toivanen, Petri, Janhunen, Pekka and Koskinen, Hannu, 2004. Magnetospheric propulsion (eMPii). Final report issue 1.3. 78 p.

3. Tammelin, Bengt et al., 2004. Improvements of severe weather measurements and sensors – EUMETNET SWS II project. 101 p.

4. Nevanlinna, Heikki, 2004. Auringon aktiivisuus ja maapallon lämpötilan vaihtelut 1856 - 2003. 43 s.

5. Ganushkina, Natalia and Pulkkinen, Tuija, 2004. Substorms-7: Proceedings of the 7th International Confrence on Substorms. 235 p.

6. Venäläinen, Ari, Sarkkula, Seppo, Wiljander, Mats, Heikkinen, Jyrki, Ervasto, Erkki, Poussu, Teemu ja Storås, Roger, 2004. Espoon kaupungin talvikunnossapidon sääindeksi. 17 s.

7. Paatero, Jussi and Holmen, Kim (eds.), 2004. The First Ny-Ålesund - Pallas-Sodankylä atmospheric research workshop, Pallas, Finland 1 - 3 March 2004 - Extended abstracts. 61 p.

8. Holopainen, Jari, 2004. Turun varhainen ilmastollinen havaintosarja. 59 s.

2005: 1. Ruuhela, Reija, Ruotsalainen, Johanna, Kangas, Markku, Aschan, Carita, Rajamäki, Erkki, Hirvonen, Mikko ja Mannelin, Tarmo, 2005. Kelimallin kehittäminen talvijalankulun turvallisuuden parantamiseksi. 47 s.

2. Laurila, Tuomas, Lohila, Annalea, Tuovinen, Juha-Pekka, Hatakka, Juha, Aurela, Mika, Thum, Tea, Walden, Jari, Kuronen, Pirjo, Talka, Markus, Pesonen, Risto, Pihlatie, Mari, Rinne, Janne, Vesala, Timo, Ettala, Matti, 2005. Kaatopaikkojen kaasupäästöjen ja haihdunnan mikrometeorologisten mittausmenetelmien kehittäminen (MIKROMETKAA). Tekesin Streams – ohjelman hankken loppuraportti. 34 s. (Ei julkaistu – Not published)

3. Siili, Tero, Huttunen, Emilia, Koskinen, Hannu ja Toivanen, Petri (toim.), 2005. Kymmenes Suomen avaruustutkijoiden kokous (FinCospar) Kokousjulkaisu. 57 s.

4. Solantie, Reijo and Pirinen, Pentti, 2005. Diurnal temperature variation in inversion situations. 34 s.

5. Venäläinen, Ari, Tuomenvirta, Heikki, Pirinen, Pentti and Drebs, Achim, 2005. A basic Finnish climate data set 1961 – 2000 – description and illustrations. 24 p.

6. Tammelin, Bengt, Säntti, Kristiina, Dobech, Hartwig, Durstewich, Michel, Ganander, Hans, Kury, Georg, Laakso, Timo, Peltola, Esa, Ronsten, Göran, 2005. Wind turbines in icing environment: improvement of tools for siting, certification and operation – NEW ICETOOLS. 127 p.

2006: 1. Mälkki, Anssi, Kauristie, Kirsti and Viljanen Ari, 2006. Auroras Now! Final Report, Volume I. 73 p.

2. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2006. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2003. 47 p.

3. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2006. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2004. 47 p.

4. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2006. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2005. 49 p.

5. Viljanen, A. (toim.), 2006. Sähkömagnetiikka 2006. Tiivistelmät – Abstracts. 30 s.

6. Tuomi, Tapio J. & Mäkelä, Antti, 2006. Salamahavainnot 2006 - Lightning observations in Finland, 2006. 39 p.

7. Merikallio, Sini, 2006. Preliminary report of the analysis and visualisation software for SMART-1 SPEDE and EPDP instruments. 70 p.

8. Solantie, Reijo, Pirinen, Pentti, 2006. Orografian huomioiminen loka-huhtikuun sademäärien alueellisissa analyyseissä. 34 s.

9. Ruosteenoja, Kimmo, Jylhä, Kirsti, Räisänen, Petri, 2006. Climate projections for the Nordic CE project – an analysis of an extended set of global regional climate model runs. 28 p.

10. Merikallio, Sini, 2006. Analysis and visualisation software for DEMETER Langmuir Probe instrument. 31 p.

2007: 1. Solantie, Reijo, Järvenoja, Simo, Pirinen, Pentti, 2007. Keskimääräisten kuukauden minimilämpötilojen alueellinen jakauma kautena 1992 – 2005 Suomessa sekä muutos kaudesta 1961 – 1990. 59 s.

2. Pulkkinen, Tuija, Hari, Ari-Matti, Haukka, Harri, Leinonen, Jussi, Toivanen, Petri, Koskinen, Hannu, André, Mats, Balasis, Georgios, Boscher, Daniel, Dandouras, Iannis, Grande, Mauel, De Keyser, John, Glassmeier, Karl-Heinz, Hapgood, Mike, Horne, Richard, Ivchenko, Nikolay, Santolik, Ondrej, Torkar, Klaus; Trotignon, Jean Gabriel, Vennerstrøm, Susanne, 2007. Waves and acceleration of relativistic particles (WARP). 36 p.

3. Harri, A-M., Leinonen, J., Merikallio, S., Paton, M., Haukka, H., Polkko, J., Linkin, V., Lipatov, V., Pichkadze, K., Polyakov, A., Uspensky, M., Vasquez, L., Guerrero, H., Crisp, D., Haberle, R., Calcutt, S., Wilson, C., Taylor, P., Lange, C., Daly, M., Richter, L., Jaumann, R., Pommereau, J-P., Forget, F., Lognonne, Ph., Zarnecki, J., 2007. MetNet – In situ observational network and orbital platform to investigate the Martian environment. 35 p.

4. Venäläinen, Ari, Saku, Seppo, Kilpeläinen, Tiina, Jylhä, Kirsti, Tuomenvirta, Heikki, Vajda, Andrea, Räisänen, Jouni, Ruosteenoja, Kimmo, 2007. Sään ääri-ilmiöistä Suomessa. 81 s.

5. Tuomi, Tapio J. & Mäkelä, Antti, 2007. Salamahavainnot 2007 - Lightning observations in Finland, 2007. 47 p.

6. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2007. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2006. 49 p.

2008 1. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2008. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2007. 49 p.

2. Verronen, Pekka T. (ed), 2008. 1st international HEPPA workshop 2008, Book of abstracts. 81 p.

3. Gregow, Hilppa, Venäläinen, Ari, Laine, Mikko, Niinimäki, Niina, Seitola, Teija, Tuomenvirta, Heikki, Jylhä, Kirsti, Tuomi, Tapio ja Mäkelä, Antti, 2008. Vaaraa aiheuttavista sääilmiöistä Suomen muuttuvassa ilmastossa. 99 s.

4. Tuomi, Tapio J. & Mäkelä, Antti, 2008. Salamahavainnot 2008 – Lightning observations in Finland, 2008. 49 p.

5. Heino, Raino and Tolonen-Kivimäki, Outi (eds), 2008. Finnish national report on systematic observations for climate – 2008. 27 p.

6. Paatero, Jussi et al., 2008. Effects of Kola air pollution on the environment in the western part of the Kola peninsula and Finnish Lapland : final report. 26 p.

2009 1. Nevanlinna, Heikki, 2009. Geomagnetismin ABC-kirja. 204 s.

2. Nevanlinna, Heikki (toim.), 2009. Ilmatieteen laitos 170 vuotta, 1838–2008. 69 s.

3. Nevanlinna, Heikki, 2009. Revontulihavainnot Suomessa, 1748–2009. 88 s.

Ilmatieteen laitos
Erik Palménin aukio 1, Helsinki
tel. (09) 19 291
www.fmi.fi

ISBN 978-951-697-697-9 (nid.)
ISBN 978-951-697-698-6 (pdf)
ISSN 0782-6079
Yliopistopaino
Helsinki 2009